TN706
C2f
c. 2

CANADA
MINISTÈRE DES MINES
HON. ES.-L. PATENAUDE, MINISTRE; R. G. MCCONNELL, SOUS-MINISTRE.
DIVISION DES MINES
EUGÈNE HAANEL, PH.D., DIRECTEUR.

Réduction électrothermique des minerais de fer en Suède.

PAR
Alfred Stansfield, D.Sc., A.R.S.M., F.R.S.C.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL
LIBRARY

OTTAWA
IMPRIMERIE DU GOUVERNEMENT
1917

N° 345

CANADA
MINISTÈRE DES MINES
HON. ES. L. PATENAUDE, MINISTRE; R. G. MCCONNELL, SOUS-MINISTRE.
DIVISION DES MINES
EUGÈNE HAANEL, PH.D., DIRECTEUR.

Réduction électrothermique des minerais de fer en Suède.

PAR
Alfred Stansfield, D.Sc., A.R.S.M., F.R.S.C.

OTTAWA
IMPRIMERIE DU GOUVERNEMENT
1917

N° 345

AVIS

Cet o 'age est une traduction du rapport publié en anglais sous le nº 344, dans l'année 1915

MINISTÈRE DES MINES

HON. LOUIS CODERRE, Ministre; R. G. McCONNELL, Sous-Ministre.

DIVISION DES MINES

EUGÈNE HAANEL, Ph.D., Directeur.

LETTRE D'ENVOI.

MONSIEUR EUGÈNE HAANEL, Ph.D.,
Directeur de la divison des mines,
Ministère des mines,
Ottawa, Ont.

Monsieur,—

Me conformant à vos instructions écrites, en date du 19 mai 1914, je suis allé en Suède au cours de juin. J'ai visité les trois usines importantes dans lesquelles se fait la réduction électrique des minerais de fer et j'ai rendu visite au général major Geijer, à M.-L. Ljungberg, à M. Assar Grönwall ainsi qu'à d'autres personnes pour lesquelles j'avais des lettres de recommandation. En outre, j'ai examiné en Suède un nouveau four pour la fabrication de l'acier et, en Norvège, une usine pour la réduction électrique du fer.

Je désire exprimer ma reconnaissance à la direction et aux ingénieurs des usines que j'ai visitées, ainsi qu'aux personnes que j'ai rencontrées en Suède et en Norvège, pour les renseignements que tous m'ont donnés ainsi que pour le cordial accueil qui m'a partout été offert.

J'ai l'honneur de vous soumettre ci-inclus le rapport de mes travaux.

J'ai l'honneur d'être,
Monsieur,
Votre obéissant serviteur,
(*Signé*) **Alfred Stansfield.**

Montréal, 2 janvier 1915.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE PARTIE.

	Pages
Rapport général	1
Fours électriques pour la réduction du fer:—	
Four Elektrometall	2
Four Helfenstein	4
Réduction électrique du fer en Suède	7
Réduction électrique du fer au Canada	8
Efficacité commerciale du four Elektrometall	10
Efficacité technique du four Elektrometall	16
Effet de la circulation du gaz sur l'économie du four Elektrometall	26

DEUXIÈME PARTIE.

Rapports condensés sous des titres spécifiques:—	
Endroits où il y a des fours pour la réduction électrique du fer en exploitation ou en voie de construction	31
Nombre, type et rendement des fours	31
Nature et analyse du minerai et des produits	32
Coût du minerai	33
Consommation et prix de l'énergie électrique, du charbon de bois, ou autre combustible, des fondants et des électrodes	34
Nombre d'hommes employés et leurs salaires	35
Coût de l'usine et entretien	36

TROISIÈME PARTIE.

Comptes rendus détaillés de quelques usines pour la réduction électrique et fours à acier électriques en Suède et en Norvège:—	
Usine de réduction électrique à Domnarfvet	37
" " " Hagfors	39
" " " Trollhättan	42
" " " Notodden	44
Estimé du coût d'une usine de réduction électrique au Canada	50
Four électrique à acier de Rennerfelt	54
Bibliographie	61
Tableau des monnaies, poids et mesures	62
Index	63

ILLUSTRATIONS.

Planche I. Four Elektrometall montrant la voûte du creuset et les contacts des électrodes ..... à la fin
" II. Idem, montrant les électrodes ..... "
" III. Idem, montrant les guides des électrodes et le trou de coulée "
" IV. Idem, montrant la disposition du métal et des laitiers ..... "
" V. Idem, vue générale ..... "
" VI. Idem, vue de la salle des moulages ..... "
" VII. Four Rennerfelt de 2 tonnes ½ ..... "

Dessins

PAGES
Fig. 1. Four Elektrometall; tracé du compteur électrique (wattmètre). 12
" 2. Four Tinfos 45
" 3. Schéma du four Rennerfelt 55
" 4. Coupes verticale et horizontale du four Rennerfelt 57
" 5. Four Rennerfelt à arcs multiples 58

RÉDUCTION ÉLECTROTHERMIQUE
DES MINERAIS DE FER
EN SUÈDE.

RÉDUCTION ÉLECTROTHERMIQUE DES MINERAIS DE FER EN SUÈDE.

PREMIÈRE PARTIE.

RAPPORT GÉNÉRAL.

INTRODUCTION.

Les recherches actuelles ont été faites dans le but d'obtenir des renseignements au sujet de l'exploitation économique ou commerciale des fours électrothermiques pour la réduction du fer, en Suède; ces renseignements ayant une haute valeur en vue de la possibilité de l'établissement de l'industrie de réduction électrique du fer en Canada.

Dans ce but l'auteur a visité la Suède au cours des mois de juin et juillet 1914 et il a examiné les principales usines de réduction en même temps qu'il a rencontré beaucoup d'ingénieurs et d'autres personnes parfaitement renseignés en tout ce qui intéresse la réduction électrique du fer.

L'étendue de ces visites a été poussée de manière à comprendre les fours de Notodden, en Norvège et un nouveau four à acier électrique exploité en Suède.

FOUR ÉLECTRIQUE POUR LA RÉDUCTION DU FER.

Actuellement il existe deux types principaux de fours électriques pour la réduction des minerais de fer:—

(1) Le four Elektrometall, dans lequel le minerai est préalablement chauffé et réduit en partie dans une cuve avant d'arriver à la chambre de réduction; le chauffage du minerai dans la cuve et la réduction chimique du fer dans le minerai étant matériellement aidés par la circulation des gaz du four, point caractéristique de ce genre de four.

(2) Les fours des types Helfenstein, Californien et Tinfos dans lesquels on ne fait rien pour chauffer préalablement le

minerai. Les cuves employées ont simplement pour but d'introduire convenablement la charge de minerai et le but principal du modèle est d'obtenir un four vaste et substantiel pour la réduction des minerais de fer par la chaleur électrique.

En Suède le four Elektrometall a été employé sur une grande échelle et est exploité commercialement règulièrement mais on fait des expériences avec un type modifié des fours Helfenstein. En Norvège le four Tinfos est quelque peu exploité.

Four Elektrometall.

Ce four a été décrit par plusieurs écrivains[1] et, conséquement, il suffira de donner un compte rendu rapide du genre le plus récent de construction de ces fours. Le creuset de fusion est circulaire et pourvu d'un trou de coulée d'où sortent le métal et les laitiers (voir planches III et IV), un trou additionnel existant pour les cas d'urgence. Le métal et les laitiers sont séparés par une dame à mesure qu'ils coulent; le métal étant coulé en gueuses (voir planches IV, V et VI) ou emporté dans une poche de coulée jusqu'au convertisseur Bessemer ou jusqu'au four Siemens-Martin. Le creuset est garni de briques réfractaires comme un haut-fourneau ordinaire et non pas avec de la magnésite comme on le faisait dans les premiers fours. La cuve du four est construite dans une enveloppe d'acier et supportée par des poutres d'acier, indépendamment du creuset. La cuve se rétrécit à un col à l'endroit où elle pénètre dans le creuset afin de laisser un espace libre dans le creuset pour l'entrée des électrodes. On tend à augmenter le diamètre de ce col, surtout quand il s'agit de traiter des minerais en poudre, car on obtient ainsi plus d'espace libre pour le passage des gaz vers le haut de la cuve.

La voûte du creuset est construite en briques réfractaires (non des briques de magnésite ou siliceuses). La voûte est refroidie en dessous par l'introduction de gaz frais du sommet du four et elle est aussi refroidie sur sa surface supérieure par de l'air froid envoyé par de nombreux tuyaux, comme le fait voir la planche I. La voûte est la partie la moins substantielle

[1] Voir la bibliographie à la fin du rapport pour les renvois.

du four mais on peut la réparer sans encourir de longs délais en introduisant dans le creuset une charge de minerai à froid et en s'en servant comme de support temporaire pour la pose de nouvelles briques.

Les électrodes sont circulaires, d'un diamètre de 600 millimètres, (2 pieds) et de 4 à 5 pieds de long (voir planche II) et on peut les attacher bout à bout par des tenons filetés en carbon qui sont vissés dans des trous avec pas de vis aux bouts des électrodes. Les porte-électrodes sont en substance les mêmes dans tous les fours Elektrometall (voir planches I, II et III) et se composent de deux guides inclinés entre lesquels repose l'électrode, supportée par les rouleaux des guides. Au bas de ces guides se trouve le collier refroidi par l'eau et construit dans la voûte du four. Ce collier est supporté par en haut de manière à ne pas presser sur la voûte et est entouré d'amiante autour de l'électrode afin que le gaz ne s'échappe pas du four. Au-dessus de cela se trouve un anneau de contact refroidi par l'eau, consistant essentiellement en une quantité de coins de métal formant un collier flexible que l'on peut serrer autour de l'électrode. Chaque coin est relié à une des barres collectrices en cuivre par un court cable flexible. Au-dessus de l'anneau de contact, qui est juste au-dessus de la voûte du four, se trouve un anneau griffe qui alimente les électrodes. L'anneau serre l'électrode et peut être déplacé en haut ou en bas des guides par de longues vis de pression. Les deux vis se manoeuvrent d'en haut par une clef à rochet (planche II) et elles sont reliées ensemble par un engrenage de manière à tourner de la même manière. En général on n'a pas besoin de déplacer les électrodes plus souvent que tous les deux ou trois jours.

Les plus grands fours ont six électrodes alimentées par un courant triphasé au moyen de trois transformateurs. Chaque transformateur est relié à deux électrodes diamétralement opposées de manière à ce que le courant électrique tende à passer entre celles-ci au lieu de passer entre les électrodes adjacentes, comme cela se produisait dans les premiers modèles. Le voltage de chaque transformateur peut se régulariser séparément au moyen de prises placées sur la spire primaire; et une fo[illegible]esque constante peut ainsi être donnée à chaque paire d[illegible]rodes

malgré les changements dans la résistance électrique entre elles. La régularisation de l'énergie électrique est ainsi effectuée en changeant le voltage de l'approvisionnement en non pas en déplaçant les électrodes en haut ou en bas. Quand une électrode est devenue trop courte, ce qui est indiqué par le voltage entre elle et les matériaux qui sont dans le four, on la pousse plus en avant comme il est dit plus haut.

La circulation des gaz du four est un des points les plus importants de ce type de four. Le gaz est pris du sommet du four, traverse des filtreurs, passe ensuite par des tuyaux où il rencontre un rideau d'aspersion d'eau, passe encore par un éventail centrifuge, aussi muni d'un jet d'eau, et, enfin, par une chambre de séparation où il perd l'eau qu'il a entraînée avec lui.

Dans quelques cas un souffleur Roots est employé pour assurer un courant constant de gaz mais, dans d'autres cas, on se contente d'un éventail laveur rotatoire pour faire ce travail. Le gaz lavé est fourni à six tuyères pénétrant en dessous de la voûte du four et entre les électrodes adjacentes. Ces tuyères ne peuvent pas servir de regards comme dans les hauts fourneaux parce que les impuretés dans les gaz noircissent rapidement les fenêtres en verre. Le fonctionnement du four dépend en grande partie de la circulation des gaz. En augmentant cette circulation on augmente la température dans la cuve, on facilite le réduction du minerai, on augmente la quantité de CO_2 dans les gaz qui s'échappent et on augmente aussi l'économie en énergie électrique et en combustible mais, d'un autre côté, on augmente l'usure des électrodes qui se trouvent attaquées par le CO_2 des gaz circulants.

Le gaz qui s'échappe des fours suédois n'est pas actuellement entièrement utilisé mais on s'en servira probablement pour chauffer des fours Siemens-Martin ou pour d'autres emplois analogues et ceci représentera une économie importante dans l'exploitation du four.

Type de four Helfenstein.

Sous ce titre on peut placer un certain nombre de fours à réduction électrique qui ressemblent au four Helfenstein ferro-

silicium.[1] Le meilleur exemple connu est le four construit par la Noble Electric Steel Company, à Heroult, Californie, É.-U.[2] Ce type de four consiste en une grande chambre de réduction, généralement de forme rectangulaire, possèdant un certain nombre d'électrodes verticales qui y pénètrent par le sommet. La charge de minerai est introduite par un certain nombre de couloirs de déchargement mais on n'essaye pas de chauffer préalablement les minerais avant de les placer dans la chambre de réduction. Le four Helfenstein[3] correspond grossièrement au creuset de four Elektrometall, la grande cuve de ce dernier étant remplacée par des couloirs de déchargement pour des charges comparativement petites. L'économie réalisée par la grande cuve et la circulation du gas du four Elektrometall est délibérément négligée dans le four Helfenstein. Au lieu de cela l'attention se concentre sur l'établissement d'une vaste chambre de réduction dans laquelle la réduction se fait très rapidement par l'énergie électrique. Dans le four Elektrometall la cuve est bien plus grande que le creuset et sa suppression rend plus facile la construction d'une chambre de réduction dans laquelle on peut utiliser un montant considérable d'énergie électrique.

L'économie augmente dans les fours électriques en même temps que la quantité d'énergie employée et, en construisant un four pour employer, disons 12,000 C.V. au lieu de 4,000 C.V. l'augmentation de l'économie ainsi obtenue doit compenser la perte en économie causée par le fait que le minerai n'est pas chauffé au préalable. En outre, on ne doit pas oublier que le gaz que donne ce genre de four est plus abondant et plus riche en oxyde de carbonne que le gaz du four Elektrometall et il aura donc une plus grande valeur pour chauffer des fours Siemens-Martin ou autres.

Le Stora Kopparbergs Bergslags A/B fait des expériences depuis quelque temps avec un four du type Helfenstein, à

---

[1] Met. and Chem. Eng. X 1912, page 686.

[2] Met. and Chem. Eng. XI, 1913, page 383.

[3] Le docteur E. J. Ljungberg m'a déclaré à l'époque de ma [illegible] e que, dans un an, il serait à même de me renseigner au sujet du four Helfenstein. Je lu[illegible] écrit en conséquence à la date du 3 août 1915 dans l'espoir d'obtenir des renseignements [illegible] pourraient entrer dans ce rapport. Je viens de recevoir une lettre qui m'annonce que le docteur Ljungberg est mort il y a quelques mois. L'auteur de la lettre ajoute qu'il est toujours empêché de donner des renseignements sur le four de Domnarfvet.

Domnarfvet, et ces expériences ont réussi bien qu'elles n'aient pas encore dépassé la période de tentatives et qu'on ne puisse pas connaître les résultats. D'abord le four a été construit selon des lignes semblables à celles du four ferro-silicium de Helfenstein mais on a dû lui faire subir d'importantes modifications avant de l'employer pour la réduction des minerais de fer.

En Norvège les Tinfos Jernverk A/S exploitent à Notodden, trois fours monophasés d'environ 1,600 C.V. chaque. Le four Tinfos (voir fig. 2) consiste en une vaste chambre de réduction rectangulaire, ayant un couloir de déchargement incliné le long de chacun de ses côtés afin de fournir les charges de minerai. Entre ces couloirs, le sommet est formé au moyen de poutres refroidies à l'eau, règnant sur toute la longueur du four et placées à une distance juste suffisante pour permettre le passage des électrodes rectangulaires dont trois sont reliées à un pole d'approvisionnement. L'électrode opposée se trouve au fond du four et est couverte d'un lit de coke bourré qui forme le fond utilisable et qu'on a trouvé durer très bien. Des détails sur le mode d'opération de ces fours sont donnés plus loin dans ce rapport mais, à cause du petit montant d'énergie employée on ne peut pas faire de comparaison entre l'efficacité de ces fours et celle des fours Elektrometall.

En comparant le type de four Elektrometall avec le type Helfenstein il faut faire remarquer qu'on éprouve des difficultés avec celui-là en utilisant des minerais pulvérisés parce que la charge de la cuve devient trop compacte pour permettre le passage des gaz. Cette difficulté doit être bien moins grave avec un four du type Helfenstein. Une comparaison semblable peut s'établir au sujet de l'usage du coke dans ces fours. Les fours Elektrometall emploient tous le charbon de bois comme réducteur et des tentatives faites pour substituer le coke au charbon de bois dans ces fours n'ont pas été couronnées de succès. On éprouve moins de difficulté en employant le coke dans un four Helfenstein simple et le coke est régulièrement utilisé dans les fours Tinfos.

La qualité élevée de la fonte suédoise et sa valeur dans la fabrication de l'acier ne peuvent être entièrement déterminées par l'analyse chimique ordinaire et tant que ce point n'aura pas été réglé par les observations directes il serait dangereux de con-

clure que la fonte fabriquée par la réduction rapide d'une charge brute dans un four à haute tension égale en qualité les produits du four Elektrometall avec sa réduction préliminaire dans la cuve et son taux plus modéré de réduction. Le four Elektrometall donne une fonte de la plus haute qualité et les Stora Kopparbergs Bergslags ont décidé d'employer ce type de four pour fabriquer leur fameux fer Dannemora, à Soderfors, malgré les succès qu'ils ont remporté avec le four Helfenstein.

RÉDUCTION ÉLECTRIQUE DU FER EN SUÈDE.

L'industrie de la réduction électrique du fer est bien établie en Suède. Cinq fours sont commercialement exploités et au moins trois autres sont en voie de construction[1].

Il est vrai que le rendement de ces fours n'est pas très élevé mais ils produisent autant que les fours à charbon de bois qu'ils remplaçent.

L'industrie suédoise du fer consiste principalement dans la réduction au charbon de bois des purs minerais suédois, dans des hauts-fourneaux de petites dimensions et de faible rendement. Cette industrie a été profitable à cause de la qualité élevée et conséquemment du prix élevé des fontes qui en résultent. La production de ce fer de haute qualité a été restreinte par l'augmentation du prix et plus encore par l'augmentation de la rareté du charbon de bois disponible pour la réduction des minerais de fer.

Le four électrique est aujourd'hui devenu un appareil sur lequel on peut se fier pour l'exploitation commerciale. La fonte qu'on en obtient est même meilleure que celle des hauts-fournaux au charbon de bois utilisant les mêmes minerais et le même comestible. Le coût de fabrication de la fonte, en utilisant les pouvoirs d'eau suédois à bon marché, est un peu moins élevé que celui du haut-fourneau à charbon de bois. Le montant de fonte que l'on peut fabriquer avec une quantité donnée de charbon de bois est trois fois plus élevé dans le four électrique que

[1] Les chiffres donnés ici se rapportent à l'époque de ma visite en Suède, en 1914, peu de temps avant la guerre. M. J. O. Bovings de la compagnie "Electric Metals, Ltd." écrivant en date du 4 juin 1915, énumère sept fours en pleine exploitation et dix autres en voie de construction.

dans le haut-fourneau au charbon de bois. Ces considérations semblent actuellement représenter la fondation de l'industrie de la réduction du minerai de fer en Suède.

Les fours Elektrometall peuvent remplacer avec avantage les petits hauts-fournaux à charbon de bois dans lesquels on fabriquait le fer de Suède de haute qualité, mais il ne faut pas oublier que la production est restreinte. Le plus vaste qui soit actuellement exploité est le four de 4,000 C.V. à Domnarfvet qui possède une production quotidienne moyenne de 30 tonnes, environ. La petite échelle sur laquelle ces fours sont exploités peut ne pas être dangereuse pour l'industrie du fer au charbon de bois parce qu'on recherche la qualité plutôt que la quantité et parce que les fours à charbon de bois doivent toujours être de petites dimensions. Cependant, ces fours ne peuvent, commercialement, entrer en concurrence avec un haut-fourneau moderne à coke dont le rendement quotidien moyen atteint 400 ou 500 tonnes. On ne doit pas oublier non plus que les tentatives faites pour substituer le coke au charbon de bois dans les fours Elektrometall n'ont pas été, jusqu'ici, heureuses bien qu'on espère que les difficultés rencontrées pourront être surmontées en construisant le four plus large et plus bas. Ce changement est nécessaire parce que le coke prend moins de place que le charbon de bois et la charge est conséquement moins ouverte et arrête le passage des gaz en haut de la cuve. Comme fondant, la chaux vive est préférable à la pierre à chaux dans les fours à coke et la raison en est sans doute dans le fait que la charge est plus perméable, plus ouverte.

DES PROBABILITÉS DE LA RÉDUCTION ÉLECTRIQUE DU FER AU CANADA.

Que pouvons nous apprendre d'après les conditions qui existent en Suède en ce qui touche à la possibilité d'établir la réduction électrique du fer au Canada.

1. À cause du prix élevé de la production, des difficultés qui entourent l'usage du coke dans les fours suédois, des petites dimensions de ces fours, nous pouvons dire que, actuellement, rien ne démontre que la réduction électrique du fer puisse être

entreprise sur une grande échelle en concurence avec l'industrie déja existante, des hauts-fournaux.

2. Si on peut réunir des minerais purs à un point donné, en même temps qu'on y obtient du charbon de bois et une force motrice de pouvoir d'eau à bon marché, il sera possible de produire économiquement au charbon de bois un fer de qualité élevée. Ce rapport présente des données qui permettront de préparer des estimés sur le coût de cette fonte électrique. La pureté des minerais disponibles et la qualité des fontes qui en résultent sont des points qu'on doit spécialement examiner et les analyses données dans ce rapport serviront à montrer les conditions dans lesquelles la fonte de Suède de qualité élevée est produite avantageusement dans les fours électriques.

On peut ajouter que beaucoup de fer de Suède est utilisé dans ce pays pour la production d'acier de qualités spéciales et pour la fabrication du fer forgé. Les usages possibles des fontes de haute qualité devront être pris en considération et peut-être même, découverts, avant de commencer la production au Canada d'un produit plutôt coûteux.

3. Les minerais canadiens, en général, n'approchent pas en qualité le degré de pureté des minerais de Suède; ainsi le minerai de la mine de Bristol, province de Québec[1] contient de 1 pour cent à 2 pour cent de soufre; tandis que les minerais suédois n'en comportent que quelques centièmes de 1 pour cent. La pratique suédoise ne jette donc aucune lumière sur la production de fonte pure au moyen de minerais sulfureux. On peut dire cependant, d'après le résultat des expériences du Dr Haanel[2] et d'autres, que le soufre peut être éliminé tout à fait complètement dans le four électrique bien que le coût de la réduction devienne certainement plus élevé que lorsque l'on emploie des minerais purs. Il reste encore à déterminer si le four Elektrometall convient parfaitement à cet usage.

4. Il semble très probable qu'en utilisant des minerais d'une pureté modérée et un combustible à bon marché, comme les rebuts de bois carbonisé, le coke du gaz, on pourrait fabriquer

---

[1] Dépôts de minerais de fer de la mine Bristol, comté de Pontiac, province de Québec, par E. Lindeman, Bulletin no 2, Ministère des Mines, 1910.

[2] Rapport du Docteur Eugène Haanel sur les expériences faites au Sault Ste. Marie, Ministère des Mines, Ottawa, 1907.

une bonne qualité de fonte pour roues de wagons dans l'un ou l'autre des fours électriques actuellement utilisés.

EFFICACITÉ COMMERCIALE DU FOUR ELEKTROMETALL.

Dans la deuxième partie de ce rapport des données numériques sont présentées en ce qui regarde la consommation de force électrique, de charbon de bois, d'électrodes et de main d'oeuvre par tonne de fonte mais on doit d'abord faire quelques remarques générales sur l'application de ces données.

Le premier point à considérer est celui de l'exploitation constante du four. Supposant qu'une usine de réduction comprenne un four et que l'usine ait un contrat pour utiliser 3,000 K.W. d'énergie électrique. Quelles proportions du montant payé seront actuellement utilisées dans le four, pendant qu'il est exploité et quelle proportion du temps total sera perdue à cause de l'arrêt du four pour de petites réparations, le regarnissage, la construction ou les jours de congé? Nous pouvons supposer que l'usine ne peut pas prendre plus que 3,000 K.W. pendant une durée de temps appréciable et que le but des usiniers est de consommer toute la charge (fours, moteurs et lumières) à une quantité aussi près que possible de 3,000 K.W.

Tout d'abord on remarquera que l'énergie électrique est fournie à haute tension (disons 10,000 volts) et transformée à 80 ou 90 volts pour servir dans le four. Ceci cause une perte de 3 pour cent environ sur toute l'énergie mais comme toutes les mesures d'énergie sont prises sur le côté haute tension des transformateurs, on ne saurait corriger de ce chef les chiffres donnés pour les kilowats-heures par tonne de fonte.

La quantité d'energie électrique consommée pour faire fonctionner les moteurs et éclairer l'usine est d'environ 2½ pour cent de l'approvisionnement total; c'est-à-dire 75 K.W. ou 100 c.v. pour l'usine qui a un four de 3,000 K.W.

Le second point à considérer est l'uniformité de la charge du four car ceci détermine jusqu'à quel point rapproché du maximum on peut porter la charge moyenne. La figure 1 est la reproduction du tracé moyen du wattmètre pour un four et elle donne une idée de l'étendue des irrégularités en énergie ainsi

que la cause de celles-ci. La coulée est faite une fois toutes les six heures et à mesure que la fonte et les laitiers sont enlevés du four, la résistance électrique augmente tandis que le courant et l'énergie diminuent. Le conducteur du four remédie à cela aussi promptement que possible en élevant le voltage de l'approvisionnement; l'énergie augmente et devient bientôt trop élevée alors qu'il faut accomplir la correction dans l'autre sens. En outre des profondes modifications apportées par la coulée il se produit des changements moins importants causés par le tassage de la charge dans le four et par d'autres causes semblables. La régularisation des électrodes nécessite aussi une baisse temporaire dans la consommation de l'énergie. Dans un four à six électrodes le courant est enlevé à une paire d'électrodes, ce qui cause la perte de près d'un tiers de l'énergie pendant qu'on fait la réglage, occupation qui demande plusieurs minutes. En interprétant le tracé nous pouvons supposer que le maximum de l'énergie disponible est de 2,700 K.W. et on verra clairement que la moyenne utilisée est inférieure à ce maximum d'environ 200 K.W. ou 7½ pour cent du maximum.

On peut sans crainte supposer que la moyenne d'énergie utilisée, tandis que le four est en opération, représente environ 92 pour cent du maximum et, en soustrayant en outre 2 pour cent pour l'éclairage et les moteurs, nous constatons que, durant l'opération, le four consomme environ 90 pour cent de l'énergie fournie à l'usine.[1]

Il reste encore à considérer le facteur important des congés et des suspensions de travail pour réparations et pour regarnir la boîte à feu parce que, durant ces périodes, on paye pour l'énergie électrique sans pourtant fabriquer de fonte. Les rapports sur les fours de Domnarfvet et de Trollhättan donnés ci-après, montrent que les congés—alors que le feu des fours est couvert se montent à 9 ou 10 jours par année (2½ pour cent) et les autres arrêts à deux ou trois semaines, ce qui fait une perte totale de temps de 8 ou 9 pour cent sur le tout.

En réunissant ces chiffres nous constatons que l'énergie utilisée par le four représente environ 82 ou 83 pour cent du montant brut payé pour cette énergie.

[1] Si nous laissons de côté les pertes au transformateur, comme il est expliqué ci-dessus, en mesurant toute l'énergie sur le côté haute tension de ce transformateur.

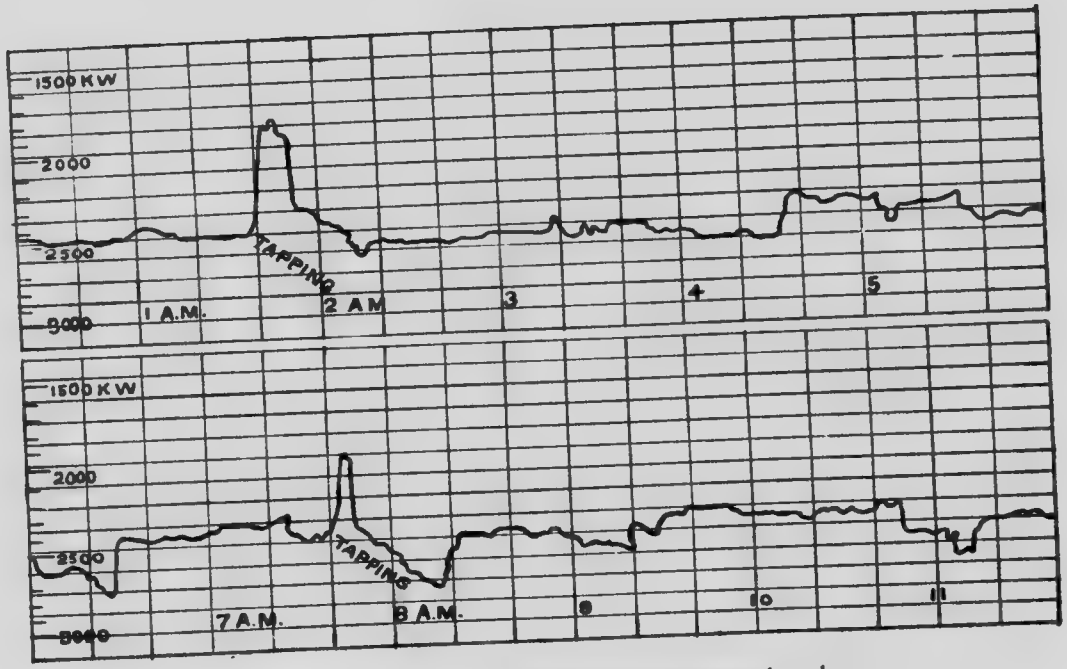


Fig. 1. Four Elektrometall. Tracé du wattmètre pendant douze heures

Dans ce cas, probablement 5 pour cent du temps total représente les arrêts, pour des réparations importantes ou pour le regarnissage, durant lesquels le four se refroidit et doit être réchauffé. On pourrait éviter en partie cette perte de temps en ayant un four additionnel qui pourrait être mis en marche dès qu'il serait nécessaire d'arrêter le premier pour le réparer mais cette ligne de conduite serait sans doute peu économique car il faudrait doubler la capacité de l'usine pour économiser 5 pour cent du temps. Cependant, si l'usine comprend trois ou quatre fours, il serait sans doute profitable d'avoir un four supplémentaire prêt à mettre en opération dès que l'un des autres doit être arrêté. En outre, en exploitant trois ou quatre fours, il sera possible d'utiliser une proportion plus élevée du maximum d'énergie car les irrégularités causées par la coulée, par exemple, seraient relativement de moindre importance et l'on pourrait s'arranger de manière à ne pas faire deux coulées simultanées des fours. Dans ces conditions il serait possible de garantir que les fours pourraient utiliser 90 pour cent de toute l'énergie payée.

Le degré possible dans la continuité des opérations est de la plus haute importance, non seulement en ce qui regarde le coût de l'énergie électrique mais aussi par rapport à la main d'oeuvre, à la direction, à l'intérêt sur le capital et aux dépenses fixes.

Les chiffres de consommation d'énergie donnés dans la deuxième partie de ce rapport se rapportent à l'énergie actuellement utilisée dans le four (et le transformateur) pendant que l'on fabrique une tonne de fonte. Ces chiffres devraient être augmentés au taux d'environ 100/82 pour trouver le nombre de kilowatt-heures qu'on doit porter au prix d'une tonne de fonte, ou le nombre de tonnes de fonte qu'on peut fabriquer pour chaque cheval-vapeur annuel qui est payé.

La somme d'énergie électrique nécessaire pour fabriquer une tonne de fonte dépend à la fois du genre de fonte fabriquée et de la proportion de fer dans le minerai. En groupant les résultats nous trouvons:—

(1) A Domnarfvet et à Trollhättan, avec des minerais contenant 58 à 60 pour cent de fer, le fer basique Bessemer demande 2,245 K.W. heures; tandis que le four Siemens-Martin à acide demande 2,116; ou un chiffre moyen de 2,200 K.W. heures.

(2) A Domnarfvet et à Hagfors, avec des minerais contenant 50 pour cent de fer, le fer au four Siemens-Martin demande 2,500 –2,600 K.W. heures dans une usine et 2,500 K.W. heures dans l'autre, ou une moyenne de 2,500 K.W. heures.

Il semble que, pour ces catégories de fer l'effet de la richesse du minerai est plus prononcé qu'une différence quelconque entre les qualités de la fonte. Pour fabriquer de la fonte grise pour l'usage des fonderies, cependant, il faut nécessairement augmenter la consommation d'énergie comme on peut le voir dans les tableaux du coût établis par M. Grönwall.

En corrigeant les chiffres 2,200 et 2,500 au taux de 100/82 nous obtenons 2,700 et 3,050 K.W. heures, ou 0·41 et 0·47 c.v. année comme montant d'énergie électrique qu'on devra payer afin d'obtenir une tonne de cette fonte en employant des minerais riches de 60 pour cent et 50 pour cent en fer. Il est donc clair que, si nous comprenons les chiffres encore plus élevés repr sentant les prix des fontes de fonderies la consommation effective d'énergie électrique pour fabriquer une tonne d' onte est, dans les conditions actuelles, tout près d'un demi che -vapeur année. Le chiffre 2,400 K.W. heures donné par M. Grönwall dans ses estimés pour la fabrication de la fonte blanche au charbon de bois avec un minerai titrant 60 pour cent peut être obtenu en prenant la consommation observée de 2,200 et en se servant du facteur 100/90, ce qui est possible dans des conditions excessivement favorables, ou encore en prenant le chiffre moins élevé 2,040 et en se servant du facteur 100/85. On peut ici remarquer que la meilleure efficacité électrique, de même que la plus grande production d'un four pourront s'obtenir en élevant autant que possible l'approvisionnement électrique. La qualité de la fonte obtenue dans ces conditions peut ne pas être aussi bonne qu'avec une énergie électrique mions élevée et la durée du four sera certainement diminuée. Ces considérations ne devraient pas être oubliées en ce qui regarde l'économie électrique d'un four; et les chiffres cités ne montrent pas nécessairement la plus grande économie possible en se servant des fours Elektrometall.

La consommation de charbon de bois est de 23·6 hectolitres à 23·95 hectolitres, disons 23·8 hectolitres ou 53 boisseaux

(bien remplis)[1] par tonne de fonte blanche fabriquée avec du minerai titrant 60% à Domnarfvet et à Trollhättan. A Hagfors, avec un minerai titrant seulement 52% il ne faut que 21 hectolitres de charbon de bois, ou 47 boisseaux (bien remplis), par tonne de fonte. Si nous disons qu'un hectolitre de charbon de bois pèse, sec, 15 kilog., nous avons 357 et 315 kilogrammes par tonne. M. Grönwall donne une estimation de 340 kilogs. ce qui tombe entre ces chiffres, et 370 kilog. pour la fonte grise.

La consommation de charbon de bois dépend de la nature du minerai (le minerai hématite en demande plus que le minerai magnétique) et de la proportion de CO_2 dans les gaz du four; plus il y a de CO_2 dans les gaz, moins on consomme de charbon de bois. C'est pour cette raison que la circulation des gaz dans le four réduit le chiffre de consommation du charbon de bois. Les fours du type Helfenstein, qui n'ont pas de cuve pour la réduction du minerai, et pas de circulation de gaz, consomment une quantité de charbon de bois de beaucoup plus élevée mais, d'un autre côté, ils fournissent une grande quantité de gaz que l'on peut utiliser pour chauffer des fours Siemens-Martin ou autres fours. A Hagfors, les gaz provenant des fours Elektrometall sont utilisés pour chauffer des fours Siemens-Martin et leur valeur a été donnée comme étant de 50 à 75 cents par tonne de fonte fabriquée dans le four.

La consommation, c'est-à-dire l'usure des électrodes, a diminué au cours des dernières années. Celles qui sont en usage actuellement et qui sont fabriquées par des Allemands sont de forme cylindrique et composées en majeure partie d'anthracite. Leur diamètre est de 550 ou 600 mm.; on les fournit en longueurs de 1m. 50 ou 2 mètres et on y a placé des tenons filetés en carbone pour les ajouter bout à bout. Conséquemment, il n'y a pas de bouts non utilisés ce qui, autrefois, représentait une grande différence entre la consommation brute et la consommation nette des électrodes. Il existe néanmoins encore une légère différence dûe au bris des électrodes pendant leur maniement.

Les chiffres cités dans ce rapport pour la consommation brute des électrodes sont de 7 kilogs, 6 kilogs, 8 kilogs et 4 kg. 64

[1] Voir la table des poids et mesures à la fin du rapport.

par tonne de fonte. Il y a aussi un chiffre plus récent de 3 kg. par tonne de fonte. M. Grönwall donne le chiffre de 6 kilogs. (pour de la fonte blanche au charbon de bois).

EFFICACITÉ TECHNIQUE DES FOURS ELEKTROMETALL.

Le four Elektrometall a été lancé avec succès en Suède et y est d'un usage commercial régulier mais d'autres fours, d'un modèle entièrement différent, sont essayés en Suède et en Californie. Conséquemment, il est très intéressant de vérifier l'efficacité du four Elektrometall et d'examiner si d'autres fours ne pourraient pas faire espèrer une efficacité plus élevée ou plus basse.

Le four Elektrometall consiste essentiellement en une chambre de réduction (ou creuset) dans laquelle la charge est finalement fondue par la chaleur électrique; et d'une cuve dans laquelle la charge est chauffée et le minerai en partie réduit par la chaleur du creuset. La chaleur est transportée par les gaz qui se produisent lors de la réduction du minerai et cette action est aidée par le retour des gaz du sommet du four au creuset, de manière à augmenter le courant des gaz dans la cuve. Les autres fours consistent en une chambre de réduction seulement ; la cuve n'existant pas ou étant de grandeur très réduite et il n'y a pas de circulation de gaz.

La grande cuve du four Elektrometall dépend pour son efficacité de la circulation des gaz, car, autrement, son contenu ne serait pas suffisament chauffé ce qui fait que la question à étudier se résoud à *l'avantage d'un système de circulation des gaz.* La circulation des gaz cause-t-elle une économie assez importante pour justifier les frais et l'incommodité d'une vaste cuve et d'un système de circulation ?

Messrs. Leffler et Nyström ont fait des calculs très précis sur l'efficacité du four de Trollhättan pendant quatre périodes qui se placent entre le 16 novembre 1910 et le 1er octobre 1911; et l'auteur a fait des calculs semblables pour une période plus rapprochée. Le résultat de ces cinq calculs est donné dans les pages qui suivent et montrent la proportion d'énergie électrique fournie qu'on utilise pour chaque partie du travail de réduction

ou qui est perdue de diverses manières. Entre autres choses les tableaux font voir:—

(1) Que la chaleur utilisée dans la réduction de la fonte, fondant la fonte et les laitiers et dans d'autres opérations nécessaires de la réduction se monte de 63 à 74 pour cent de l'approvisionnement électrique total; ce chiffre augmentant dans les dernières périodes.

(2) Que la principale source de déperdition qui figure au tableau est la radiation qui se produit du sommet du four et sur d'autres parties du four ainsi que de la chaleur perdue par refroidissement dans les porte-électrodes refroidis par courant d'eau; les colliers et autres parties. Ces pertes ont varié de 31 à 19 pour cent pendant les essais et ont diminué dans les dernières périodes.

(3) L'auteur a dans chaque cas calculé et ajouté à la table, l'énergie potentielle ou énergie calorique des gaz qui s'échappent du sommet du four. Le montant de cette énergie varie de 84 à 74 pour cent de l'équivalent en chaleur de l'approvisionnement électrique et constitue, dans chaque cas *plus que le total de la chaleur utilisée dans l'opération de réduction.*

Le but de la circulation des gaz est d'utiliser autant que possible, *dans la cuve du four*, l'énergie de réduction [illegible] gie calorique du monoxyde de carbone des gaz du four; mais, même quand cela s'accomplit jusqu'à la limite extrême pratique, le gaz qui reste possède une valeur calorique plus élevée que les besoins nets du travail de réduction, ou environ 75 pour cent du total de l'approvisionnement électrique.

(4) La chaleur sensible échappée du four avec les gaz qui en sortent est sans importance (à cause de la basse température du sommet du four) et il ne se produit pas de perte considérable de chaleur de la même manière par le système de circulation des gaz.

Des tableaux publiés par le A/B Elektrometall[1] montrent la quantité de coke (ou charbon de bois) et l'énergie électrique nécessaires pour produire une tonne de fonte d'un minerai donné, et selon la proportion de CO_2 dans les gaz du four. Les tableaux

[1] Voir page 29.

montrent qu'avec une augmentation dans la proportion de CO_2 la consommation de coke et d'énergie électrique diminuent.

Les résultats des expériences à Trollhättan font voir un écart très élevé dans les proportions de CO_2 dans les gaz, proportions qui se chiffrent de 8 à 35 pour cent, selon la qualité du minerai et du fondant, comme aussi selon la rapidité de circulation des gaz; mais on ne possède que peu de données en ce qui regarde la quantité de CO_2 dans le cas où il n'y a pas de circulation. A Trollhättan, au cours des dernières expériences, la tendance a été, apparament, de diminuer la rapidité de circulation des gaz; on obtenait, pendant de longues périodes moins que 20 pour cent de CO_2 dans les gaz qui s'échappaient.

Il semble que l'effet de la circulation peut s'établir par une comparaison de deux cas dans lesquels, en utilisant le même minerai, etc., le CO_2 était de 10 pour cent sans circulation des gaz et de 25 pour cent avec circulation.

L'auteur a fait un calcul de ce genre—simplifié autant que possible mais conservant tous les facteurs essentiels pour établir une juste comparaison entre les deux cas. Les résultats sont donnés aux pages 24 et 27 et ils font voir que la circulation des gaz provoque une économie considérable qui se monte (par tonne de fonte) à 35 kilogs 2. de coke (11 pour cent du total) et 152 K.W. (7 pour cent du total); mais que, dans ce cas, le gaz qui s'échappe est plus pauvre de 340,000 calories en énergie calorique (23 pour cent du total). La valeur calorique du coke et la force calorique effective de l'énergie électrique économisée égalent ensemble la diminution en énergie calorique du gaz.

En réunissant les résultats de tous les calculs il ressort:—(1) que, sans circulation, les gaz d'échappement ont une valeur calorique à peu près égale aux besoins caloriques du four; (2) qu'avec une circulation de gaz, un quart environ de la valeur du gaz qui s'échappe est utilisé dans le four, économisant ainsi 11 pour cent du coke et 7 pour cent de l'énergie électrique.

Nous voyons ainsi que si les gaz d'échappement pouvaient s'utiliser parfaitement le four pourrait fonctionner avec une faible fraction de l'énergie actuellement nécessaire à son opération et que le système de circulation n'effectue qu'un quart environ d'une grande économie possible en théorie.

Si, au lieu du système actuel de cuve et de circulation des gaz nous utilisions un système par lequel les gaz seraient consumés et serviraient à chauffer le minerai et le fondant (soit avant soit après y avoir ajouté le combustible) il pourrait être possible de réaliser une économie plus grande que celle qui se fait actuellement ; mais ce système ne saurait avoir une grande efficacité—peut-être 50 pour cent, au plus—il serait compliqué, encombrant et consumerait la totalité des gaz.

Une autre alternative serait de laisser de côté la circulation des gaz et de considérer ces gaz comme sous-produits, à être utilisés pour le chauffage de fours Siemens-Martin pour transformer le fer en acier. De cette manière, l'efficacité du four de réduction semblerait moins élevée mais l'efficacité totale serait augmentée. Le gaz produit par la fabrication d'une tonne de fonte dans le four électrique suffirait presque à la fabrication d'une tonne d'acier dans le four Siemens-Martin.

Si les gaz d'échappement peuvent être utilisés économiquement de cette manière on pourra se permettre de se dispenser des systèmes de circulation et de la cuve, en entier ou en partie, si ces changements sont sonsidérés comme désirables dans l'intérêt de la simplicité et du bon marché dans la construction, ou dans le but d'augmenter la grandeur et la capacité de la chambre de réduction.

Ces conclusions peuvent se résumer comme suit: (1) la grande cuve et le système de circulation augmentent l'efficacité du four de réduction mais insuffisament pour compenser les complications et les dépenses qui en résultent; (2) si les gaz du four sont utilisés pour la fabrication de l'acier, l'économie du système actuel devient encore moins apparente; (3) la grande cuve du four actuel constitue probablement un obstacle sérieux quand on désire augmenter matériellement la grandeur de l'unité afin de produire, disons 100 tonnes de fonte, tous les jours, au lieu de 20 ou 30; et (4) si un four de cette capacité peut être mis en opération avec succès les économies en chaleur qui accompagnent l'augmentation en dimensions compenseront probablement les pertes encourues par l'absence de la cuve actuelle.

En établissant ces conclusions il ne faut pas perdre de vue le fait que le four Elektrometall a démontré son efficacité dans l'ex-

ploitation commerc..e en Suède; alors que le four Helfenstein en est encore à la période des essais. En Californie, cependant, où il faut produire une fonte de fonderie, un simple four de réduction avec cuve a été trouvé supérieur.

DISTRIBUTION DE LA CHALEUR DANS LE FOUR DE TROLLHATTAN

CALCULS ÉTABLIS PAR MESSRS. LEFFLER ET NYSTROM.

Série 1. Charges 1-10. 16 novembre 1910 au 11 février 1911.

Minerai presque entièrement magnétique. 63·5% Fe.

Fonte Four Siemens-Martin 13 tonnes 1 par jour.

Fe	96·41%	Si	0·34%	S	0·012%
C	3·57%	Mn	·044%	P	0·019%

Approvisionnement électrique

Phase I 13,731 amp. 65·2 volts.
„ II 13,416 „ 65·9 „
1319 Kilowatts.

Durée du travail 2009·9 hrs.
Temps de repos 105·7 hrs.
Total du temps 2115·6 hrs.

POUR UNE TONNE DE FONTE.

Fournitures.

1525 kg. de minerai.
85·3 kg. de pierre à chaux.
415·70 kg. de charbon de bois.
0·45 kg. de coke.
6·76 kg. d'électrodes.
2296 watt-heures.

Sous-produits.

190·7 kg. laitier.
733·64 kg de gaz secs à 60°C.
CO_2 10·96% CH_4 2·48%
CO 79·59% H 6·97%

DISTRIBUTION DU CALORIQUE.

Reduction de Fe. Si. etc.	1,640,786 Cals.			
Oxydation du carbone	908,830 „			
Réduction nette de Fe. etc. par C.	731,956 „			37·4%
Fusion de la fonte	302,400 „			18·5%
Fonte du laitier	100,000 „			5·8%
Décomposition des carbonates	49,134 „			2·5%
Evaporation de l'eau	53,179 „			2·7%
Chaleur sensible dans les gaz	9,463 „			0·5%
Total du calorique utilisé	1,246,132 „	= 1454	K.W.h. =	63·33%
Perte aux transformateurs		42	„	1·83%
Perte aux conducteurs basse tension		76	„	3·31%
Perte par refroidissement à l'eau		150	„	6·53%
Perte par radiation, etc. (par différence)		574	„	25·00%
Kilowatt-heures fournis		2296	„	100·00%
Energie potentielle des gaz 1,672,000 Cals.		= 1944	„	84·6 %

Série 2. Charges 30-41. Du 9 avril au 18 mai 1911.

Minerai environ 5 parties de magnétite et 3 d'hématite 55·9% Fe.
Fonte Four Siemens-Martin 15 tonnes 1 par jour.

Fe 95·35%	Si 1·00%	S 0·020%
C 3·52%	Mn 0·89%	P 0·013%

Approvisionnement électrique.

Phase I	13,564 amps 75 volts.	Durée du travail	851·7 heures.
„ II	11,817 „ 83 „	Durée du repos	68·3 „
1717 kilowatts		Temps total	920.0 heures.

POUR UNE TONNE DE FONTE.

Fournitures.
1725·7 kilog de minerai
48·5 kilog de pierre à chaux
92·5 kilog de chaux vive
396·7 kilog de charbon de bois
4·99 kilog d'électrodes.
2481 kilowatt-heures.

Sous-produits.
455 kilog de laitier.
738 kilog de gaz secs à 64°C.
CO_2 8·77% CH_4 3·18%
CO 81·57% H 6·48%

DISTRIBUTION DU CALORIQUE.

Réduction de Fe. Si. etc.	1,722,155	Cals.		
Oxydation du carbone	882,863	„		
Réduction nette de Fe etc. par C	839,292	„		= 39·46%
Fusion de la fonte	302,400	„		14·22 „
Fusion des laitiers	227,500	„		10·70 „
Décomposition de la chaux	27·391	„		1·29 „
Évaporation de l'eau	38·189	„		1·80 „
Chaleur sensible des gaz	10·361	„		0·49 „
Total de la chaleur utilisée	1,445,133	„	= 1686 K.W.h =	67·96 „
Pertes au transformateur			68 „	2·74 %
Pertes aux conducteurs basse tension			95 „	2·83 „
Pertes par le refroidissement à l'eau			163 „	6·57 „
Perte par la radiation, etc. (par différence)			469 „	18·90 „
Kilowatt-heures fournis			2,481 „	100·00 „
Energie potentielle des gaz 1,623,000 Cals.			= 1890 „	76·2 „

Série 3; Charges 30 et 31. 9 avril au 20 avril 1911.

(Partie de la série 2)

Minerai grillé contenant environ 1 partie de Fe_3O_4 à deux parties de Fe_2O_3, 52·2% de Fe.

Fonte Four Siémens-Martin 17·26 tonnes par jour.

Fe	94·62%	Si	1·14%	S	0·015%
C	3·68%	Mn	1·33%	P	0·012%

Approvisionnement électrique

Phase I	11,922 amp.	81·9 volts.	Temps du travail	230·3	heures
„ II	10,406	„ 88·2 „	„ d'arrêt	9·8	„
1680 kilowatts			Total	240·1	„

PAR TONNE DE FONTE.

Fournitures

1478·5 Kg minerai grillé
303·4 „ briquettes de minerai
45·0 „ pierre à chaux
55·2 „ Chaux vive
359·8 „ Charbon de bois
4·99 „ d'électrodes
2241 Kilowatt-heures

Sous-produits

505 Kilogs de laitier
702·9 „ de gaz secs à 74°C
CO_2 20·72% CH_4 3·40%
CO 68·97% H 6·91%

DISTRIBUTION DU CALORIQUE.

Réduction de Fe, Si, etc. en métal	1,768,874 Cals.			
Oxydation du carbone	1,004,246 „			
Réduction de Fe, etc. par le carbone	764,628 „			= 39·79 „
Fusion de la fonte	302,400 „			15·77 „
Fusion du laitier	252,500 „			13·16 „
Décomposition des carbonates	22,911 „			1·20 „
Evaporation de l'eau	12,423 „			0·65 „
Chaleur sensible du gaz	11,643 „			0·60 „
Total de la chaleur utilisée	1,366,505 „	= 1595	K.W.hrs.	= 71·17 „
Pertes au transformateur		61	„	2·72 „
Pertes aux conducteurs basse tension		68	„	3·03 „
Pertes par refroidissement à eau		146	„	6·53 „
Pertes par radiation (par dif.)		371	„	16·55 „
Kilowatt-heures fournis		2,241	„	100·00 „
Énergie potentielle en gaz 1,424,000 Cal.		= 1,655	„	73· 8 „

Série 4; charge 45. 3 septembre au 1er octobre 1911.

Minerai, presque exclusivement magnétite (Tuolluvaara non grillé) Fe. 64·8%

Fonte Four Siemens-Martin 19·2 tonnes par jour.

Fe 95·58%	Si 0·36%	S 0·0086%
C 3·64%	Mn 0·40%	P 0·0181%

Approvisionnement électrique

Phase I	10,012 ampères	78·7 volts.	Temps de travail	668·5 heures
„ II	9,729	„ 82·9	„ d'arrêt	3·8 „
1407 kilowatts			Total	672·3 „

PAR TONNE DE FONTE.

Fournitures

1.478·3	Kilog minerai
59·7	„ pierre à chaux brute
318·5	„ charbon de bois
5·2	„ électrodes
1749	Kilowatt heures

Sous produits

165	kilog de laitier
663·7	„ de gaz secs à 62°C.

CO_2	28·90%	CH_4	1·69%
CO	55·95%	H	13·39%
		N	0·07%

DISTRIBUTION DU CALORIQUE.

Réduction de Fe, Si, etc. en métal	1,620,249	Cals.		
Oxydation du carbone	947,928	„		
Réduction de Fe, etc. par le carbone	672,321	„		=44·82%
Fusion de la fonte	300,000	„		20·04 „
Fusion des laitiers	75,000	„		5·01 „
Décomposition des carbonates	34,757	„		2·32 „
Evaporation de l'eau	24,283	„		1·62 „
Chaleur sensible des gaz	8,711	„		0·58 „
Calorique total utilisé	1,115,072	„	=1,301 K.W.hr.	=74·39 „
Pertes aux transformateurs			49·0 „	2·80%
Pertes aux conducteurs basse tension			51·0 „	2·90 „
Perte par refroidissement par eau			226·2 „	12·94 „
„ „ circulation des gaz			17·8 „	1·02 „
„ „ radiation (par différence)			104·0 „	5·95 „
Kilowatt heures fournis			1,749·0 „	100·00 „
Énergie potentielle des gaz 1,127,700 Cals.			=1,312 „	75·00 „

DISTRIBUTION DU CALORIQUE DANS LE FOUR DE TROLLHÄTTAN

CALCUL FAIT PAR A. STANSFIELD.

Charges 68 et 69. 5-19 avril 1912.

Minerai, presque entièrement magnétite 52·0% Fe.

Fonte Bessemer 16·4 tonnes par jour.

Fe	94·24%	Si	0·76%	S	0·0197%
C	3·52%	Mn	1·436%	P	0·0218%

Approvisionnement électrique

Phase I	12,613 ampères	77·1 volts.	Durée du travail	322·9 heures	
„ II	12,135 „	77·8 „	„ d'arrêt	19·8 „	
				342·7 „	

1665 Kilowatts

PAR TONNE DE FONTE.

Fournitures

1812 Kilog de minerai
92 „ de pierre à chaux
369·5 „ de charbon de bois
4·13 „ d'électrodes
2245 Kilowatt-heures

Sous-produits

450 kilog de laitier.
820 „ de gaz secs à 42° C.

CO_2	29·2%	CH_4	0·9%
CO	66·9%	H	0·7%
		N	2·3%

DISTRIBUTION DU CALORIQUE.

Réduction de Fe. Si, etc.	1,580,200 Cals.			
Oxidation du carbone	759,000 „			
Réduction nette de Fe. par C.	821,200 „	=955 kilowatt hrs.		39·1%
Fusion de la fonte	300,000 „	349	„	14·3%
„ du laitier	217,500 „	252	„	10·3 „
Décomposition des carbonates	151,500 „	176	„	7·2 „
Evaporation de l'eau	25,050 „	29	„	1·2 „
Chaleur sensible des gaz	6,050 „	7	„	0·3 „
Total de chaleur	1,521,300 „	1768	„	72·4 „
Pertes aux transformateurs		67	„	2·7 „
„ conducteurs de basse tension		73	„	3·0 „
„ par refroidissement par eau		345	„	14·1 „
„ par circulation des gaz	9,070 „	11	„	0·4 „
„ radiation (par différence)		181	„	7·4 „
Kilowatt-heures fournis		2445		100·0 „
Énergie potentielle en gaz		1855		75·9 „

NOTES SUR L'EXACTITUDE DES CALCULS.

(1) *Réduction de la fonte, etc.* Dans les calculs suédois la chaleur exigée pour la "réduction du fer, silicium, etc." correspond à la dissociation des oxydes en métal et en oxygène, comme $Fe_3O_4 = 3\ Fe + 2O_2$ et la chaleur de l'oxydation du carbone par l'oxygène à CO et CO_2 est donnée comme gain définitif, comme dans les hauts-fournaux, où le carbone est oxydé par le courant d'air. Dans l'opinion de l'auteur, on arriverait plus près de la fer, vérité en combinant ces réactions et en calculant la réduction du etc., **par le carbone**, comme dans l'équation $Fe_3O_4 + 3C = 3Fe + 2\ CO + 2CO_2$. La chaleur exigée pour cette réduction varie naturellement avec la proportion de CO à CO_2 dans les gaz qui en résultent mais elle représente en règle générale environ 40 pour cent de la valeur calorique de l'électricité fournie.

(2) *Efficacité électrique.* Les divers items de calorique exigés par le four ont été separés par les auteurs suédois en deux groupes: d'un côté, ceux qui sont nécessaires; et de l'autre, ceux des pertes; la somme des items nécessaires divisés par le tout représente l'efficacité électrique. La division semble exacte, sauf dans le cas de la chaleur sensible des gaz du four. C'est là un item qui peut varier selon le mode de construction du four, la conduite de ce four et, conséquemment, cet item devrait passer au compte des pertes.

(3) *Pertes par le refroidissement par eau.* Cet important élément de pertes provient de deux causes: (1) le refroidissement des électrodes par les contacts et colliers refroidis par l'eau; et (2) le refroidissement par l'eau d'autres parties du four. Le refroidissement des électrodes semble un élément inévitable de pertes, et Carl Hering a démontré comment on peut le réduire à son minimum. Dans les conditions d'opération d'un four Elektrometall une perte d'environ 7 pour cent de l'énergie électrique fournie semble inévitable. La perte réelle par cette cause est d'environ 10 pour cent et le reste, 3 pour cent et 4 pour cent (dans le dernier calcul) représente le refroidissement par eau du four lui-même.

(4) Les charges (68 et 69) choisies par l'auteur pour ses calculs, correspondent à une consommation électrique sensiblement plus élevée (2,445 K.W. heures) que celle employée habi-

tuellement à cette époque. Cependant, le choix a été fait parce que, durant une période raisonnable, les conditions étaient constantes, et parce que la fonte ainsi obtenue représentait plutôt que dans les autres cas, la qualité qui serait en demande au Canada.

EFFET DE LA CIRCULATION DES GAZ DANS L'ÉCONOMIE DU FOUR ELEKTROMETALL.

Calcul de la quantité d'énergie électrique et de combustible exigés pour une tonne de fonte avec (a) circulation de gaz et (b) sans circulation de gaz du four.

Suppositions:—

(1) Le minerai est magnétique et contient 60 pour cent de fer.

(2) Le combustible est le coke contenant 85 pour cent de carbone fixe et 15 pour cent de cendres.

(3) Le fondant consiste en chaux vive et égale en montant un quart de la gangue du minerai et un quart des cendres du coke.

(4) La fonte contient 96·6 pour cent de fer et 3·4 pour cent de carbone.

(5) L'efficacité électrique du four est de 78 pour cent.

(6) Les gaz du four égalent en volume:—

(a) Sans circulation, 10 pour cent CO_2, 90% CO;

(b) avec circulation, 25 pour cent CO_2, 75% CO.

Remarques générales. 1000 kilogs de fonte contiennent 34 kilogs de carbone et 966 kilog. de fer. Ceci exige 1,610 kilog. de magnétite.

1610 kg. de magnétite contiennent:	966 kg.	de fer
	368 „	d'oxygène (combiné au fer)
	276 „	de gangue
	1,610 kg.	

(a) Sans circulation; les gaz contiennent 10% de CO_2 et 90% de CO.

CO_2 des gaz contient	66·9 kg. d'oxygène et	25·1 kilog. de carbone	
CO " " "	301·1 " " "	225·8 " " "	
	368·0 " " "	250·9 " " "	
En comprenant la fonte		34·0	
Total du carbone nécessaire		284·9	
Coke de réduction (85% de carbone)			= 295 Kg.
" " carburation			= 40 "
Total du coke contenant 50 kg. de cendres			= 335 "
Gangue du minerai et cendre du coke			= 326 "
Chaux vive (un quart du précédent)			= 81 "
Total du laitier			407 "

CALORIQUE NÉCESSAIRE.

966 Kg. Fe de Fe_3O_4	1,557,100 Cals.		
25·1 Kg. Carbone en CO_2	203,300 "		
225·8 " carbone en CO	548,694 "		
Oxydation du carbone	751,994 "		
Réduction nette du fer par le carbone	805,106 "		
Fusion de 1000 kg. de fonte	300,000 "		
Fusion de 407 kg. de laitiers	203,500 "		
Évaporation de l'humidité et échauffement sensible des gaz; disons	35,000 "		
	1,343,606 "	= 1562 K. W.H.	
Ceci demande (avec efficacité de 78%)		2002 "	
Puissance calorifique du gaz échappé	= 1,280,286 Cals.		

(*b*) *Avec circulation; les gaz contiennent 25% de CO_2 et 75% de CO.*

Le CO_2 des gaz contient	147·2 kg. d'oxygène et	55·2 kg. de carbone.
Le CO " " "	220·8 " " "	165·6 " " "
	368·0	220.8
En ajoutant la fonte		34·0
Total de carbone nécessaire		254·8 " " "

Coke pour la réduction (85% de carbone)	259·8 Kg.
Coke pour la carburation	40·0 "
Total du coke contenant 45 kg. de cendres	299·8 Kg.
Gangue du minerai et cendres de coke	321 "
Chaux vive (un quart du précédent)	80 "
Poids total des laitiers	401 "

CALORIQUE NÉCESSAIRE.

966 Kg. Fe de Fe_3O_4	1,577,100 Cals.	
55·2 kg. de carbone en CO_2	447,120 "	
165·6 " de carbone en CO	402,408 "	
Oxydation du carbone	849,528 "	
Réduction nette du fer par le carbone	707,572 "	
Fusion de 1000 kg. de fonte	300,000 "	
Fusion de 401 " " laitiers	200,500 "	
Évaporation de l'humidité et échauffement sensible des gaz; disons	35,000 "	
	1,243,072 "	= 1446 K.W.H.
Ce qui demande (Efficacité de 78%)		1853 "
Énergie calorifique des gaz échappés	=938,952 "	

(*c*) *Comparison de deux cas.*

	10% de gaz	*25% de gaz*	*Différence.*
Coke	355 kilog.	229·8 kilog.	35·2 kilog.
Énergie électrique	2002 K.W. H.	1853 K.W. H.	149 K.W. H.
Gaz	1,280,286 Cal.	938,952 Cal.	341,334 Cal.

Ceci démontre que la circulation des gaz, augmentant le CO_2 de 10% à 25% économisera 35·2 kilogrammes de coke et 149 kilowatt-heures par tonne de fonte fabriquée, mais aussi que les gaz du four seront plus pauvres de 341,334 calories. L'économie de coke et d'énergie électrique s'accomplit aux dépens de l'énergie calorifique des gaz du four.

La circulation des gaz a permis d'utiliser dans le four environ un quart de leur énergie potentielle calorifique en réalisant une économie équivalente en coke et en énergie électrique.

(d) Les chiffres publiés par le A/B Elektrometall dans les mêmes conditions supposées de minerai, coke et efficacité sont comme suit:—

	10% de gaz.	*25% de gaz.*	*Différence.*
Coke.....	332 kilog.	294 kilog.	38 kilog.
Énergie électrique.....	2020 K W. Hrs.	1875 K.W. Hrs.	145 K.W. Hrs.

L'effet qui se produit sur la consommation du coke et d'énergie électrique en variant les proportions de CO_2 dans les gaz du four est exposé dans les tableaux suivants.

Chiffres publiés par le A/B Elektrometall.

TABLEAU I.

Consommation du coke.

On suppose que le minerai consiste en Fe_3O_4.
" " " le coke contient 85% de C.
" " " la fonte " 3·4% de C.

Kilogrammes de coke par tonne de fonte.

CO_2 dans le gaz du four.....	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
Coke pour la réduction.....	325	308	292	279	266	254	244	234
Coke pour le Carbone combiné	40	40	40	40	40	40	40	40
Total.....	365	348	332	319	306	294	284	274

Pour la réduction du minerai hématite la consommation de coke est 12·5% plus élevée.

TABLEAU II.

Consommation d'énergie.

L'efficacité électrique de l'usine est de 78%.

CO_2 dans le gaz de four	0%		10%		20%		30%	
Proportion de Fe dans la charge	KWH par tonne fonte	Tonnes fer par C.V. année	KWH par tonne fonte	Tonnes fer par C.V. année	KWH par tonne fonte	Tonnes fer par C.V. année	KWH par tonne fonte	Tonnes fer par C.V. année
65%	2,056	3·13	1,926	3·35	1,826	3·54	1,739	3·71
60%	2,150	3·00	2,020	3·19	1,920	3·36	1,833	3·52
50%	2,390	2·72	2,260	2·85	2,160	2·98	2,073	3·11
45%	2 550	2·53	2,420	2·66	2,320	2·78	2,233	2·89

Lorsqu'on emploie de la c aux non grillée, la consommation de coke et l'énergie électrique est un peu plus élevée que ne le montrent les tableaux ci-dessus.

DEUXIÈME PARTIE.

RAPPORTS CONDENSÉS SOUS DES TITRES SPÉCIFIQUES.

ENDROITS OÙ IL Y A DES FOURS ÉLECTRIQUES EN EXPLOITATION OU EN VOIE DE CONSTRUCTION.

Les fours de Suède commercialement exploités sont principalement du type "Elektrometall". Ces fours réduisent au moyen du charbon de bois, des minerais de fer, ordinaires et triés, à Domnarfvet, Hagfors et Trollhättan. D'autres fours de ce type sont en voie de construction à Hagfors et à Söderfors. A Domnarfvet on expérimente avec un four du type Helfenstein modifié. A Notodden et à Ulefos, en Norvège, on exploite commercialement des fours du type "Tinfos" qui font la réduction du minerai de fer au coke.

Le nombre, le type et la capacité des fours se voient dans la liste qui suit:—

NOMBRE, TYPE ET RENDEMENT DES FOURS

1. A *Domnarfvet*, la "Stora Kopparbergs A/B" possède un four Elektrometall de 4,000 C.V. exploité commercialement et produisant environ 30 tonnes par jour de fonte au charbon de bois. Cette compagnie expérimente aussi un type modifié de four Helfenstein de 5,000 C.V. ou plus, dont il nous est impossible de donner actuellement des détails.

2. A *Söderfors*, la même compagnie fait construire un four Elektrometall de 6,000 C.V.

3. A *Hagfors*, la "Uddeholms Aktiebolag" possède trois fours Elektrometall de 3,000 C.V. chacun, en pleine exploitation, chacun produisant par jour de 20 à 25 tonnes de fonte au charbon de bois. Elle doit faire construire deux autres fours Elektrometall de 4,000 à 5,000 C.V. chacun et l'un d'eux est commencé.

4. A *Trollhättan*, la compagnie Strömsnäs Jernverks exploite un four Elektrometall de 3,000 C.V. qui produit quotidiennement environ 22 tonnes de fonte au charbon de bois.

5. A *Notodden*, (Norvège), la Tinfos Jernverks A/S" possède quatre fours (type Tinfos) de 1,600 C.V. chacun. Deux[1] de ces fours sont exploités commercialement, brûlent du coke (au lieu de charbon de bois) et produisent environ 10 tonnes de fonte par jour avec un minerai pauvre. Un petit four du même type est exploité à Ulefos par M. Cappelen.

M. J. O. Böving de la "Electro Metals Ltd" écrivant en date du 4 juin 1915, donne la liste suivante de fours exploités ou en construction en Suède. J'ai numéroté sa liste pour faciliter la comparaison avec celle qui précède.

1. A *Domnarfvet*, deux fours de 3,000 C.V. et un de 6,000 C.V. en exploitation.

2. A *Söderfors*, trois fours de 3,000 C.V. (en construction ?)

2a. A *Ljusne*, un four de 3,000 C.V. (en construction ?)

3. A *Hagfors*, trois fours de 3,400 en exploitation et trois autres en construction.

3a. A *Nykroppa*, deux fours de 3,400 C.V. en construction.

4. A *Trollhättan*, un four de 2,000 C.V. en opération et un de 3,000 en construction.

5. A *Notodden*, j'ai appris, d'une autre source, que trois ou quatre fours sont en opération continuelle.

6. Dans les confins nords de la Suède on doit instamment construire une usine métallurgique de 25,000 C.V.

NATURE ET ANALYSE DU MINERAI ET DES PRODUITS.

1. A *Domnarfvet*, le minerai phosphorique hématite Skärning, de Grängesberg, est réduit dans un four Elektrometall avec du charbon de bois et des fondants et il donne une fonte phosphorique. Le minerai contient 60% de fer, 5% de silicium, 1% de phosphore et des traces de soufre.

La fonte contient ·5–1·0% de silicium, 1% de manganèse, 2% de phosphore, 0·010% de soufre et 3·6 à 3·8% de carbone.

Des laitiers Bessemer sont utilisés dans la charge pour donner le manganèse, ainsi que de l'apatite pour augmenter la quantité de phosphore dans la fonte qui est convertie en acier par le procédé Bessemer basique.

[1] En général, trois fonctionnent simultanément.

Des minerais sans phosphore (environ 50% de fer dans la charge) sont réduits (actuellement avec un four Helfenstein) au charbon de bois pour donner une fonte de qualité supérieure. Cette fonte est employée dans un four Siemens-Martin à acide et l'on y fabrique de l'acier supérieur pour l'exportation.

2. A *Söderfors*, on fabrique depuis longtemps une fonte de qualité supérieure avec les minerais de Dannemora, dans un haut-fourneau au charbon de bois. Le four Elektrometall qui se construit actuellement à cet endroit est destiné à la fabrication de cette fonte de qualité spéciale.

3. A *Hagfors*, on fabrique dans un four Siemens-Martin, de la fonte contenant 0·5% de silicium, 0·4% de manganèse, 0·015% de phosphore et 0·010% de soufre ainsi que de la fonte Bessemer contenant 1·0 à 1·2% de silicium, 2·5 à 3·0% de manganèse, 0·018% de phosphore et 0·005% ou des traces de soufre.

Une charge pour le four Siemens-Martin consistait de

38%	de minerai	Finnmossen
28%	„	Taberg.
20%	„	Tuolluvaara
4%	„	Langban
10%	„	Nordmark
100	10% de pierre à chaux	

Ce mélange de minerais (sans la chaux) devait contenir environ 57% de fer, 0·03% de soufre et 0·007% de phosphore. La charge entière devait contenir 52% de fer.

4. A *Trollhättan*, une charge ordinaire se compose de

50%	de minerai	Tuolluvaara
34%	„	Lerbergs
16%	„	concentré Lerbergs
100	8% de pierre à chaux	

Le mélange de minerais (sans la chaux) devait contenir 63% de fer, 0·010% de soufre, et 0·015% de phosphore. La charge entière contiendrait environ 58% de fer.

La fonte qui est destinée à la fabrication de l'acier par le procédé Siemens-Martin acidique contient 0·05 à 1% de silicium (généralement environ 0·3%), 0·15 à 0·20 % de manganèse, 0·005 à 0·015% de soufre et 0·020% de phosphore.

La charge actuelle[1] se compose de 50% le minerai Tuolluvaara, 30% de Lerbergs et 20% de Lerbergs concentrés avec 9½% de pierre à chaux. Les concentrés et le minerai pulvérisé forment environ 40% de la charge.

5. A *Notodden*, les minerais de fer que l'on réduit contiennent environ 44% de fer, 0·025% de soufre et 0·022 à 0·040 de phosphore. On se sert de coke contenant 1·2% de soufre et 0·02 de phosphore. La fonte blanche provenant de ces matériaux contient environ 0·4% de silicium, 0·03% de soufre et 0·06% de phosphore. La fonte grise contient 2·0% de silicium, 0·02% de soufre et 0·065% de phosphore. En mettant une plus forte proportion de chaux on peut encore réduire la quantité de soufre, la fonte contenant 1·0 à 1·5% de silicium, 0·08 de phosphore et 0·01 ou des traces de soufre.

LE COÛT DU MINERAI.

Les compagnies métallurgiques ne désirent pas publier les chiffres exacts des prix de leurs minerais mais on peut accepter la somme de 15 couronnes ou $4.00 comme représentant le prix d'une tonne de minerai suédois, livrée à l'usine.

CONSOMMATION ET PRIX DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE, DU CHARBON DE BOIS OU AUTRES COMBUSTIBLES, DES FONDANTS ET ÉLECTRODES.

1. A *Domnarfvet*, la fabrication de la fonte basique Bessemer avec des minerais phosphoriques (60% de fer) dans les fours Elektrometall demande 2·245 K.W.H. d'énergie électrique, coûtant environ 0·6 öre (0·16 cents) par kilowatt-heure; 23·6 hectolitres de charbon de bois, coûtant environ 60 öre (16 cents) de l'hectolitre; 52 kilogs de laitier Bessemer; 30 kilogs de phosphorite et 7·0 kilogs d'électrodes coûtant 35 öres du kilog (9 cents), pour chaque tonne de fonte.

[1] On a porté sans difficultés la proportion de concentrés à 27%.

La fonte destinée au four Siemens-Martin acide, provenant de minerais contenant seulement 50% de fer par charge exige de 2,500 à 2,600 kilowatt-heures d'énergie par tonne de fonte.

2. A *Hagfors*, une tonne de fonte Siemens-Martin fabriquée dans un four Elektrometall de 3,200 C.V. avec une charge contenant environ 52% de fer exige 2,500 kilowatt heures d'énergie, 21 hectolitres de charbon, 180 kilogs de pierre à chaux et 6 kilog. d'électrodes. Le charbon de bois coûte 75 öres (20 cents) l'hectolitre; la pierre à chaux 5 couronnes ($1.35) la tonne et les électrodes 30 öres (8 cents) le kg.

Pour faire une tonne de fonte Bessemer (acide) il faut 2,600 à 2,800 K.W.H. d'énergie électrique et 21 hectolitres de charbon de bois, l'usure des électrodes est de 8 kg. environ.

3. A *Trollhättan*, pour faire une tonne de fonte Siemens-Martin (acide) dans le four Elektrometall avec une charge contenant 58% de fer il fallait, en 1913, 2,116 k.w.h. d'énergie électrique, 23·95 hectos. de charbon de bois, 137 kilogs de chaux et 4·64 kilogs. d'électrodes.

4. A *Notodden*, dans un four Tinfos de 1,600 C.V. une tonne de fonte blanche réduite au coke, avec une charge contenant 44% de fer, demande 2,800 kilowatt heures d'énergie électrique. Une tonne de fonte grise faite avec une charge contenant 39% de fer demande 3,000 K.W. heures d'énergie électrique.

Le prix du courant électrique constitue un important facteur dans l'exploitation des fours de réduction électriques, mais les données ne sont pas toujours faciles à obtenir pour la publication. Dans les hauts-fournaux de Suède le prix du courant peut être estimé en général de 25 à 45 couronnes ($7 à $12) par cheval-vapeur-année ou de 33 à 60 couronnes ($9 à $16) par kilowatt-année; ces prix se rapportant à la charge maximum qu'on peut obtenir des lignes d'approvisionnement à haute tension.

NOMBRE D'HOMMES EMPLOYÉS ET LEURS SALAIRES.

Une usine de réduction électrique comprenant un four Elektrometall, comme celle de Trollhättan, exige le service de 25 à 30 hommes. Ceci comprend le contremaitre, les ouvriers du four, les hommes employés à broyer le minerai et à le transporter ainsi que le charbon de bois; les ouvriers pour faire la coulée,

enlever les laitiers et pour charger et décharger les matériaux; on comprend aussi l'électricien, le forgeron, le charpentier et le gardien. Les salaires sont en moyenne de 4 couronnes (1.10) par jour et cela coûtera près de 6 couronnes (1.60) par tonne de fonte.[1]

A *Hagfors*, trois fours de 3,000 C.V. sont conduits par 50 hommes qui sont payés de 42 à 44 öre (12 cents) de l'heure et travaillant 8 heures par jour dans la plupart des cas. Ceci avec les boni et les gages plus élevés du fondeur signifiera 3 couronnes ($0.80) par tonne de fonte.

A *Domnarfvei*, où l'on exploite d'autres fours, 16 hommes sont chargés du four de 4,000 C.V., les hommes travaillant en bordées de 12 heures et gagnent environ de 4 couronnes et demie à 5 couronnes ($1.20 à $1.35) par jour. Ceci équivaut à 3 couronnes ($0.80) par tonne de fonte.

COÛT DE L'USINE ET ENTRETIEN.

En Suède, les frais d'installation d'une usine de réduction électrique de trois fours Elektrometall de 300 à 4,000 C.V. sont estimé à 300,000 couronnes ($80,000) par four.

Les frais de réparations et d'entretien dépendant en grande partie de la nécessité qui existe de reconstruire le creuset et la voûte du four et de regarnir la cuve et ceci, à son tour, dépend dans une certaine mesure de la nature des produits. Une garniture de four dure bien plus longtemps lorsque l'on fabrique de la fonte blanche que lorsque l'on fabrique la fonte grise. On peut placer le chiffre des frais annuels de réparations et d'entretien d'un four à 12,000 couronnes ($3,250).

---

[1] Les dépenses de main-d'oeuvre à Trollhättan comprennent tous les ouvriers nécessaires à une usine isolée. Les chiffres donnés pour les autres usines ne comprennent que les hommes employés strictement au four, à l'exclusion de l'électricien, du forgeron, du charpentier, et autres.

TROISIÈME PARTIE.

COMPTES DÉTAILLÉS DE QUELQUES USINES DE RÉDUCTION ÉLECTRIQUES ET DE FOURS ÉLECTRIQUES A ACIER EN SUÈDE ET EN NORVÈGE.

USINE DE RÉDUCTION ÉLECTRIQUE DE DOMNARFVET.

L'usine de réduction électrique de la "Stora Kopparbergs Bergslags A/B", à Domnarfvet, contient un four Elektrometall de 4,000 C.V. exploité depuis novembre 1911; un four Helfenstein modifié de 5,000 C.V. et plus et un four Helfenstein ferro-silicium de 7,000 C.V. C'est dans cette usine que le four Elektrometall a été d'abord essayé et les premiers types ont été décrits longuement par le docteur Haanel.[1] Le four Elektrometall actuel a été construit sur le modèle du four de 3,000 C.V. à Trollhättan et réunit les expériences pratiques acquises avec ce four. A cause de ses grandes dimensions le four de Domnarfvet est muni de six électrodes et utilise un courant triphasé.

Voici un rapport du travail de ce four à partir du 22 juillet 1913 jusqu'à la date de ma visite en juin 1914.

Rapport sur le four électrique Elektrometall de 4,000 C.V. à Domnarfvet, à partir de 7 heures du soir le 22 juillet 1913 jusqu'à mi[illegible] le 27 juin 1914.

	Heures	*Jours*
Total du temps employé	8153	= 339·7
Temps des opérations	7542	314·2
Congés (Noel et vacances d'été)	239	10·0
Autre temps perdu	372	15·5
Total du temps perdu	611	25·5
Pourcentage du temps perdu 7·5%		

[1] Dr. Eugène Haanel "Rapport sur une enquête au sujet du four électrique à cuve de Domnarfvet, Suède" Ottawa, 1909.

Dr. Eugène Haanel "Progrès récents dans la construction des fours électriques pour la production de la fonte, de l'acier et du zinc," Ottawa, 1910.

MATÉRIAUX RÉDUITS.

	Total	Par tonne de fonte
Minerai Skärning	13,597,550 *Kg.*	1,516 *Kg.*
Laitiers Bessemer	462,440 „	52 „
Apatite (phosphorite)	272,640 „	30 „
	14,332,630 „	1,598 „
Charbon de bois, 23,345 charges de 9 hectolitres	210,105 Hl.	23·6 Hl.
„ à 15 kg. de l'hecto	3,151,575 kg.	351 kg.
Électrodes (brut)	61950 kg.	6·91 kg.
Énergie électrique	20,138,000 K.W.H.	2,245 K.W.H

Charge moyenne durant les heures de travail . . 2670 K.W. = 92% de la charge
Charge moyenne tout le temps . . . . . 2470 „ = 85% „ „
(La charge entière est prise comme . . 2,900 K.W. = 3940 C.V.E.)

Fonte Thomas produite	8,968,000 kgs.
„ „ „ par jour de travail	28·5 tonnes.
„ „ „ „ „ total	26·4 „
„ „ „ par c.v. année utilisé	2·87 „
„ „ „ „ „ „ payé	2·44 „

(8,968 tonnes en 339·7 jours et prenant 3,940 C.V.)

ANALYSE DES CHARGES ET DES PRODUITS.

Minerai Skärning de Gränsgesberg.

Fe_2O_3	86%
(Fe	60%)
P	1%
SiO_2	5%

Fonte Thomas.

P	2%
Mn	1%
Si	0·5–1%
S	0·010%
C	3·6–3·7%
Fe (par différence)	92·6%

Laitier Bessemer

MnO	30%
SiO_2	50%
FeO, CaO, Al_2O_3	20%

Charbon de bois.

Humidité	10–[illegible] %
Carbone fixe	60–70%
Matières volatiles	20–25%
Cendres	0·5%

Apatite.

Fe	30%
P	6%

FOURS ÉLECTRIQUES DE HAGFORS.

La compagnie Uddeholms exploite dans son usine de Hagfors trois fours Elektrometall[1], d'une force nominale de 3,000 C.V. chacun mais capables d'utiliser 3,400 C.V. Cette usine constitue donc la plus grande usine de réduction électrique du monde. On doit l'agrandir en y ajoutant deux autres fours de 4,000 à 5,000 C.V. et l'un d'eux est actuellement en voie de construction. L'énergie électrique provient de l'usine génératrice de la compagnie à Forshultforsen, à 9 milles et demi de là; usine possèdant une capacité de 21,000 C.V.; et d'une autre usine électrique de Malta-Forsen, qui fournit 4,000 C.V. On construit maintenant deux autres générateurs de 4,000 C.V. chacun, ce qui portera le total d'énergie électrique à 33,000 C.V. L'énergie se transmet par un courant triphasé de 25 cycles à un voltage de 12,000 et il est réduit par les transformateurs des fours à environ 80 volts; l'amplitude étant de 50 à 100 volts.

Chaque four possède six électrodes cylindriques qui sont reliées aux termini à basse tensions de trois transformateurs de 1,000 K.W. ampères de capacité, chaque transformateur se trouvant relié à une paire d'electrodes placée sur un des diamètres du four. Les extrémités de haute tension des transformateurs sont reliées en delta au courant triphasé d'approvisionnement et les raccordements peuvent être changés de neuf crans sur chaque armature de haute tension ce qui fait que le voltage fourni aux trois paires d'électrodes peut se varier à volonté entre 50 et 100 volts indépendamment du voltage sur chacune des deux autres paires d'électrodes. Le facteur d'énergie (Cos.$\varnothing$) se trouve de 0·95 à 0·97. L'installation électrique est protégée par des parafoudres et on a pris la précaution de pouvoir remplacer par un transformateur neuf tout transformateur qui deviendrait défectueux.

Les trois fours que l'on voit sur les planches III, IV, V et VI sont contenus dans un seul édifice divisé en trois parties, l'une pour l'installation électrique, la seconde pour les fours et la

[1] Les premiers fours ont été construits par la compagnie Elektrometall mais les fours nos 3 et 4, ont été établis par la compagnie Uddeholms d'après les plans de son propre ingénieur M. Edvin Fornander, qui a modifié les plans originaux sur plusieurs points importants.

troisième réservée à la fonderie et à l'enlèvement des gueuses et du laitier. Les appareils électriques sont séparés du four par un mur coupe-feu.

La fonte en fusion peut être coulée dans des moules à gueuses ouverts, ou enlevée dans des poches de coulée pour être conduite aux fours Siemens-Martin ou aux convertisseurs Bessemer. Le laitier est coulé dans des moules et a été utilisé comme pierre de construction. Le laitier et le métal coulent du même orifice du four et sont séparés par une pelle de retenue.

La fonte que ces fours produisent pour servir dans les fours Siemens-Martin (acide) contient:—

Silicium	0·5%	Phosphore	0·015%
Manganèse	0·4%	Soufre	0·010%

Sa fracture est partie blanche et partie grise (mouchetée). La charge de minerai pour fabriquer cette fonte consiste en:—

38%	de minerai	Finnmossen
28%	"	Taberg
20%	"	Tuoluvaara
4%	"	Langban
10%	"	Nordmark
100	10% de pierre à chaux	

Cette charge contient environ 52% de fer et pour fabriquer une tonne de fonte elle exige de 2,200 à 2,500 kilowatt heures et 21 hectolitres, ou 47 boisseaux (remplis) de charbon de bois provenant de pin et de sapin. La consommation d'électrodes est d'environ 6 kg. par tonne de fonte.

La fonte qui doit servir dans les convertisseurs Bessemer contient:—

Silicium	1·0 à 1·2%
Manganèse	3·0 à 2·5%
Phosphore	0·018%
Soufre	de 0·005% à des traces.

La charge pour fabriquer cette fonte diffère un peu de la charge précédente et comprend des minerais manganifères qui

donnent le manganèse nécessaire. On emploie 21 hectolitres ou 47 boisseaux (remplis) de charbon de bois par tonne de fonte et la dépense d'énergie électrique est de 2,600 à 2,800 kilowatt heures par tonne. La consommation d'électrodes est d'environ 8 kilogrammes par tonne de fonte.

Le rendement ordinaire quotidien d'un four est de 23 tonnes de fonte pour le four Siemens-Martin et de 20 tonnes de fonte Bessemer.

Un point très important par rapport à l'économie de combustible dans les fours Elektrometall est la circulation des gaz car celle-ci est cause que les gaz d'échappement contiennent une forte proportion de CO_2. Cette circulation a de plus l'effet d'augmenter l'usure des électrodes, point moins important, cependant, que la consommation du combustible. A Hagfors, par exemple, avec une rapide circulation de gaz, gaz qui contiennent conséquement 21 à 26% de CO_2, la consommation de charbon de bois se monte à 21–22 hectolitres et l'usure des électrodes est de 6 kilogs. A Trollhättan, avec la même charge, mais avec une circulation moins intense, et un moindre pourcentage de CO_2 la consommation de combustible est de 24-25 hectolitres et celle des électrodes n'est que de 3 kg. La différence de trois hectolitres de charbon représente une économie de 2.25 couronnes (60 cents) tandis que la différence de 3kg. d'électrodes représente une perte de 90 öre (24 cents). D'un autre côté, la circulation plus rapide coûte plus cher d'entretien et sera plus difficile avec des minerais pulverisés et de plus, les gaz du four auront moins de valeur pour servir dans un four Siemens-Martin ou autre.

A Hagfors le gaz possède un pouvoir calorifique d'environ 2,300 calories au mètre cube et il sert dans un four Siemens-Martin. Sa valeur est d'environ 3 couronnes à 3 couronnes et demie (environ 90 cents) par tonne de fonte.

A l'usine de Hagsfors le travail est divisé entre trois équipes de six heures, c'est-à-dire que chaque équipe travaille six heures et se repose douze heures. Les trois fours demandent le personel suivant:—

	Total
6 pour couler, par relève de six heures, à 44 öre de l'heure.....	18
3 pour le gueulard, par relève six heures à 44 öre de l'heure.....	9
2 pour le dépôt de charbon, par relève de 6 heures, à 42 öre de l'heure et 1 homme de plus le jour.....	7
4 pour broyer le minerai, par relève de huit heures, à 42 öre de l'heure.....	8
1 contremaître, par relève de six heures, à 140 couronnes par mois	3
	45

Quant à ce qui touche aux réparations nécessaires pour ces fours, l'un d'eux a fonctionné un an et demi et peut durer encore 2 ou 3 ans, mais il faut un nouveau creuset au bout de 8 mois.

FOUR DE RÉDUCTION ÉLECTRIQUE A TROLLHÄTTAN

A la suite du succès des travaux expérimentaux des usines de Domnarfvet, au cours de 1909 et 1910 l'Association suédoise des Maîtres de Forges "Jernkontoret" a construit un four de 2,500–3,000 C.V. à Trollhättan.

Ce four a commencé à fonctionner en novembre 1910 et a fonctionné pour des essais d'expérience en 1911 et 1912, les détails de ces essais ont été donnés dans les rapports de J. A. Leffler et d'autres, dans les années 1911 et 1913, Ces essais du four étant concluants il a été passé à la "Strömsnäs Jernverks A/B" qui l'exploite commercialement depuis octobre 1912. Ce four est photographié sur les planches I et II.

Suit un rapport détaillé pour l'année 1913.

Rapport sur le four Elektrometall de 3,000 C.V. à Trollhättan pendant l'année 1913.

MATÉRAUX RÉDUITS.

	Kilogrammes	*Kg. par tonne de fonte*
Minerai Kiruna A	1,023,080	
„ Tuolluvaara	4,738,855	
„ Lerbergs	3,564,255	
„ Parsbergs	47,970	
„ Tabergs	7,820	
Masse	9,381,980	1,279
Concentré Lerbergs	2,041,985	
„ Persbergs	140,590	
19% de minerai concentré	2,182,575	299
Poids total du minerai	11,564,555	1,578
Calcaire, 8·6% du minerai	1,001,155	136
Poids total de la charge	12,565,710	1,714

	Total	*Par tonne de fonte*
Charbon de bois, 27,019 charges de 6·5 Hectos	175,623 Hl.	23·95 Hl.
„ „ si un hectolitre pèse 15kg	2,634,355 Kg.	359·2 Kg.
(Charge totale par hectolitre de charbon de bois, 71·55 Kg.)		
Usure des électrodes (brute)	34,039 Kg.	4·64 Kg.
„ „ „ (nette)	30,366 „	4·14 „

CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

Durée des opérations	7,970·6 heures	91% du total
Durée des arrêts	789·4 „	9% „
Total du temps	8,760 „	

Kilowatt-heures (y compris moteurs et lumières) .. Total 15,838,250
Par tonne de fonte .. 2,160

Kilowatt-heures pour le four seul, par tonne de fonte 2,116

		% de 2,200
Charge moyenne en opération, toute l'usine	1,990 K.W.	90·5
„ „ „ „ four seul	1,945 „	88·5
„ „ temps complet, toute l'usine	1,808 „	82·2
„ „ „ „ four seul	1,770 „	80·4

La capacité totale des transformateurs est de 2,200 K.W.H. ou 3,000 C.V.
Chaque électrode est habituellement chargée de 500 K.W. ou 2,000 K.W. pour le four.

RENDEMENT EN FONTE.

Production totale, 1,511 coulées, 7,333,995 kilogrammes.
" " 63·42% du minerai; 58·36% de la charge totale.
Rendement quotidien, temps complet, 20·08 tonnes.
" " durée des opérations, 22·05 tonnes.
" par cheval-vapeur année(énergie employée pour toute l'usine) 2·98 tonnes
" " " " (énergie employée pour le four seulement) 3·05 tonnes.
" " " " (énergie payée pour toute l'usine) = 7,334 + 3,000 = 2·44 tonnes.
La fonte contient:—Silicium 0·05–1·0% (ordinairement 0·3%).
Manganèse 0·15–0·20%; soufre, 0·005–0·015%; phosphore, 0·020%.

NOTE—Pendant la durée des opérations décrites dans le rapport cidessus on a laissé refroidir le four; le foyer et la voûte ont été regarnis et le four a été chauffé de nouveau.

FOUR DE RÉDUCTION ÉLECTRIQUE "TINFOS."

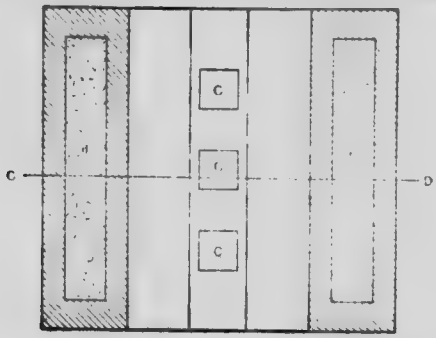
La "Tinfos Jernverk A/S," possède, à Notodden, Norvège. une usine pour la réduction electrothermique des minerais de fer.

Le four en usage est le four "Tinfos" qui ressemble à l'ancien four Tinfos décrit par Paul Nicou. On le nomme aussi four Bie Lorentzen, ce qui est inexact, car le four actuellement usité ne possède pas les points essentiels du four inventé par Hans Bie Lorentzen, et aussi décrit par Paul Nicou.

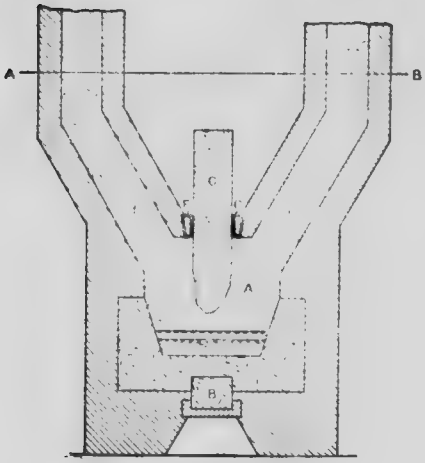
Le four consiste d'abord en une vaste chambre de réduction rectangulaire "A" (Fig. 2) ayant à sa base une électrode de carbone prise dans la sole et trois électrodes carrées pénétrant par la voûte; une que l'on peut voir en "C". La charge, qui consiste en minerai, pierre à chaux et coke, pénètre dans le four par deux couloirs de déchargement situés en "d" et "e" et qui s'étendent tout le long du four. La voûte et les couloirs sont supportés par deux poutres creuses refroidies par l'eau et qui s'étendent d'un bout à l'autre du four. ("F" et "G") La fonte et les laitiers sont coulés d'une extrémité du four.

Les trois électrodes mobiles "C" sont toutes raccordées au même pole d'approvisionnement électrique et l'électrode de la base est rapportée à l'autre pôle, ce qui fait qu'on emploie un courant monophasé. Pour utiliser l'approvisionnement tri-

phasé on exploite trois fours à la fois. Chaque four utilise environ 1,600 C.V.E. à environ 35–55 volts; 50 cycles.



Coupe horizontale A-B.



Coupe verticale C-D.

Fig. 2. Le four Tinfos.

On peut ici faire observer que le four Tinfos est essentiellement le même que le four Haanel-Héroult[1] décrit dans le rapport

[1] Four électrique Haanel-Héroult:—Rapport sur les expériences faites au Sault-Sainte-Marie, sous les auspices du gouvernement, sur la réduction des minerais de fer par le procédé électro-thermique" par Eugène Haanel, Ph. D. Ottawa, 1907, page 92.

"Le four électrique, sa construction, son exploitation et ses usages" par Alfred Stansfield, D. Sc. New York, 1914, page 184.

du docteur Haanel au cours de ses expériences du Sault-Ste-Marie, en 1907. L'électrode supérieure, (ou les électrodes) entre verticalement au sommet de l'un ou l'autre des fours et, entre les deux couloirs qui apportent la charge; l'électrode opposée se trouvant dans chaque cas au fond du four. Les deux fours utilisent aussi le courant alternatif monophasé.

La différence de construction entre les deux fours repose sur le seul fait que le four Haanel-Héroult n'a qu'une seule électrode et, conséquemment, un creuset ou chambre de réduction presque circulaire tandis que le four Tinfos a trois électrodes supérieures et une longue chambre de réduction rectangulaire. La longueur de cette chambre a amené la construction de deux poutres creuses, refroidies à l'eau, pour supporter la voûte du four Tinfos, tandis que la voûte du four Haanel-Héroult est supportée par un simple écran de briques.

Les détails suivants sur l'exploitation du four Tinfos ont été recueillis et condensés par l'auteur d'un rapport publié par la "Tinfos Jernverk A/S".

MINERAIS EMPLOYÉS.

Grevinde Wedels Grube Langö.

Fe	44·20%	Al_2O_3	5·72%
SiO_2	11·04 „	Mn	0·12 „
CaO	9·16 „	P	0·041„
MgO	1·27 „	S	0·026„

Fru Ankers Grube Langö.

Fe	44·30%	Al_2O_3	3·38%
SiO_2	19·22 „	Mn	0·18 „
CaO	8·01 „	P	0·022„
MgO	5·62 „	S	0·021„

Coke.

Cendres 8·64%; S 1·20%; P, 0·020%.

Calcaire.

SiO_2	5·50%	$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	1·20%
CaO	51·72 „	S	0·06 „

FOUR No 3, DU 12 AU 14 MARS 1913.

Produit: Fonte blanche; 2,800 K.W. H. par tonne.

Charge: Grevinde Wedels Grube...300 kg.
Fru Ankers Grube.....100 „
Coke..... 75 „

Chiffres Donnés.

Date	*Coulée*	*Kg.*	*C.*	*Si.*	*Mn.*	*P.*	*S.*
12–3–13	26	3310		0·47			0·038
	27	3250		0·36			·027
	28	3190		0·44	0·09	0·060	·014
13–3–13	29	2239	3·79				·028
	30	3209	3·27	0·39			·020
	31	2587	3·29	0·28			·034
14–3–13	32	3024	3·22	0·28	·10	0·065	·041
	33	2900		0·60			·025
	34	3020		0·68			·005
		26729					

8910 par jour.
2970 par coulée.

FOUR No 3, DU 17 AU 20 MARS 1914.

Produit Fonte grise, 2·950 K.W. heures par tonne.
Charge Fru Ankers Grube, 400 kg.
Pierre à chaux 50 „
Coke 70 „

Résumé des opérations.

Les coulées 300 à 308 ont donné 26,781 kilogrammes de fonte ce qui équivaut à 2,976 kilogrammes par coulée. L'analyse moyenne a donné:—
C, 3·15%; Si, 2·0%; Mn. 0·2%; P. 0·065%; S, 0·015-0·030.%

FOUR No 3, DU 29 AVRIL AU 4 MAI 1914.

Produit Fonte grise, 3·010 kilowatt heures par tonne.
Charge Grevinde Wedels Grube 200 kgs.
Fru Ankers Grube 200 „
Pierre à chaux 70 „
Coke 76 „

Résumé des opérations.

Les coulées 815 à 826 ont donné 35·806 kilogrammes de fonte ce qui équivaut à 2,984 lgs. par coulée. L'analyse moyenne a été environ:
Si, 1·0—1·5%; Mn, 0·05—0·10%; P, 0·08%; S, traces à 0·01%.

Le four Tinfos diffère de l'Elektrometall en ce sens que ses électrodes sont placées au milieu et que le minerai est supporté latéralement; arrangement qui semble favoriser l'économie du

calorique. La difficulté fondamentale de supporter la voûte d'un four de ce genre semble avoir été surmontée d'une manière satisfaisante.

Dans le four Tinfos les gaz passent par les couloirs de déchargement, chauffant ainsi la charge jusqu'à un certain point mais il n'y a pas de circulation et, actuellement, les gaz ne sont nullement utilisés en dehors du four. Dans un four de ce type comme dans le four Helfenstein, il faudrait d'abord estimer la valeur des gaz qui s'échappent avant de comparer son efficacité à celle du four Elektrometall dans lequel les gaz sont utilisés sur une plus vaste échelle à l'intérieur du four.

Ce four est aussi intéressant parce qu'on y emploie le coke au lieu de charbon de bois comme agent de réduction. Pour obtenir une grande quantité de fonte de qualité modérée, on découvrira souvent que le coke est préférable au charbon de bois à cause de son bon marché et de sa plus grande abondance. Jusqu'ici le four Elektrometall n'a pas donné satisfaction avec l'emploi du coke et ceci ajoute de l'intérêt au four qui peut utiliser ce combustible.

Les analyses publiées montrent qu'en utilisant du coke contenant 1·2% de soufre on a obtenu de la fonte blanche contenant 0·03% de soufre et cela sans employer de calcaire dans la charge. En faisant de la fonte grise la quantité de soufre a été réduite à 0·02 et 0·01% selon la quantité de calcaire employée. La direction m'affirme qu'on arrive à n'avoir que des traces de soufre—c'est-à-dire moins de 0·01%—mais ceci augmente naturellement les frais car on doit employer plus de chaux.

Les données exposées ci-dessus ne sont pas assez complètes pour permettre de faire une comparaison satisfaisante avec les rapports du four Elektrometall, mais ceci est de peu d'importance car les conditions sont très différentes dans les deux cas. Le four Tinfos utilise des minerais moins riches, du coke au lieu du charbon de bois et moins d'énergie totale, ce qui empêche toute comparaison utile.

Le four Tinfos diffère essentiellement du four Elektrometall et du four Helfenstein en employant un courant monophasé au lieu du courant triphasé. Il s'en suit que tout le courant élec-

trique pénétrant par les électrodes supérieures doit traverser la charge, le métal en fusion et sortir par l'électrode du fond. Dans les autres fours le courant entre et sort par les électrodes supérieures et il n'est pas nécessaire de faire de raccordement à l'extrémité inférieure du four. Pour cette raison la chaleur se trouve trop disséminée et la température dans la zone de fusion n'est pas assez élevée pour éliminer le soufre et pour d'autres fins du même genre. Dans le four à courant triphasé la distribution du courant électrique peut probablement se régler en modifiant la hauteur des électrodes car, plus celles-ci sont placées bas, plus le courant électrique passe de l'une à l'autre directement jusqu'au métal en fusion qui forme le point neutre du four. Il est certain que le four à courant monophasé supprime complètement cette difficulté mais il faut nécessairement employer trois fours pour utiliser le courant triphasé. Une autre difficulté se présente en essayant d'égaliser le courant fourni à chacune des électrodes supérieures, et on pourra trouver nécessaire d'approvisionner chaque électrode d'un transformateur séparé ayant son propre régulateur de voltage afin d'éviter de monter ou descendre les électrodes pour arriver à une distribution égale du courant.

Le four à courant monophasé a aussi le désavantage d'employer un voltage peu élevé et d'augmenter ainsi l'usure en électrodes, cables et transformateurs. Dans le four Tinfos le voltage peu élevé peut être causé dans une certaine mesure par l'emploi du coke au lieu du charbon de bois (le coke étant meilleur conducteur) mais, à part de cela, un four employant une électrode de fond aura toujours un voltage moins élevé que celui qui emploie des électrodes mobiles reliées en séries.

Comme il n'y a pas de charbon à coke en Norvège la Tinfos Jernverk est obligé d'importer le coke pour ses fours. D'abord on employait un bon coke de fonderie mais aujourd'hui, on emploie un coke de gaz coûtant 21 /. ($5.10) la tonne et qu'on trouve en Angleterre.

ESTIMÉ APPROXIMATIF DU COÛT D'UNE USINE DE RÉDUCTION ÉLECTRO-THERMIQUE AU CANADA.

Par Assar Grönwall.

1914.

DIMENSIONS DE L'USINE: 3 fours électriques de 4,000 C.V.

Excavation, nivellement, voies de chemin de fer, entrepôt pour le minerai et le charbon de bois ou le coke, fondations pour les bâtiments et les fours	$30,000
Bâtiments:—	
Atelier de construction légère en fer pour les 3 fours	$ 60,000
Bâtiment pour le concasseur, laboratoire, y compris les instruments, atelier de réparations, entrepôt et autres petits ateliers	$ 12,000
Fours:—	
3 fours de 4,000 C.V. avec éventails et tuyères à gaz	75,000
Transformateurs électriques avec conducteurs à basse tension	100,000
Moules, poches, outils et instruments	10,000
Grue mobile d'une force de 5 tonnes	6,000
Concasseur et appareil pour transporter le minerai concassé au four	7,000
Voie d'évitement pour le transport et autres appareils de transport	7,000
Tuyau à eau et tuyaux de renvoi	5,000
Plans, surveillance de la construction et frais imprévus	48,000
	$360,000

Estimation approximative pour la production au Canada de 1,000 kilogrammes (2,204 livres de fonte).

(a) FONTE ÉLECTRIQUE BLANCHE, (AU CHARBON DE BOIS)

1600 kilogs de minerai @ [illegible] / tonne	$6.40
100 „ de chaux (Cao) @ [illegible] /tonne	1.50
340 „ de charbon de bois @ [illegible] /tonne	4·08
0·37 C.V.A. (2400 k.w.h.) ([illegible] „ 10 /C.V.A.	3.70
6 kilogs d'électrodes @ „ 85 /la tonne	0·51
Main d'oeuvre et mécanique	1.20
Bureaux et organisation	0.50
Réparations	0.50
Dépréciation (6% de $360,000 pour un an de production)	0.72
Frais généraux	0.50
Faux frais	0.39
	$20.0

(b) FONTE GRISE ÉLECTRIQUE (AU CHARBON DE BOIS):

1600 kilogs de minerai	@ $ 4/ la tonne	$6.40
100 „ de chaux (Cao)	@ „ 15/tonne	1.50
370 „ charbon de bois	@ „ 12/la tonne	4.44
0·40 C.V.A. (2600 k.w.h.)	@ „ 10/C.V.A.	4.00
8 kilogs d'électrodes	@ „ 85/la tonne	0.68
Main-d'oeuvre et mécanique		1.20
Bureaux et organisation		0.50
Réparations		0.50
Dépréciation (6% de $360.000 par année de production)		0.72
Frais généraux		0.50
Faux frais		0.46
		$21.00

(c) FONTE BLANCHE ÉLECTRIQUE (AU COKE).

1600 kilogs de minerai	@ $ 4/la tonne	6.40
120 „ de chaux	@ „ 15,la tonne	1.80
370 „ de coke (85%C)	@ „ 5/latonne	1·85
0·39 C.V.A. (2500 k.w.h)	@ „ 10/C.V.A.	3.90
7 kilogs d'électrodes	@ „ 85/la tonne	0.60
Main-d'oeuvre et mécanique		1.20
Bureaux et organisation		0.50
Réparations		0.50
Dépréciation (6% de $360.000 par année de production)		0.72
Frais généraux		0.50
Faux frais		0.53
		$18.50

(d) FONTE GRISE ÉLECTRIQUE (AU COKE):

1600 kilogs de minerai	@ $ 4/la tonne	$6.40
130 „ de chaux	@ „ 15/la tonne	1.95
400 „ de coke	@ „ 5/la tonne	2.00
0·42 C.V.A. (2700 k.w.h.)	@ „ 10/C.V.A.	4.20
9 „ kilogs d'électrodes	@ „ 85/la tonne	0.77
Main d'oeuvre et mécanique		1.20
Bureaux et organisation		0.50
Réparations		0.60
Dépréciation (6% de $360.000 par année de production)		0.72
Frais généraux		0.50
Faux frais		0.66
Sauf le droit régalien		$19.50

Frais d'installation de l'usine.

Le four Elektrometall et son outillage électrique ou autre ont été si complètement décrits dans diverses publications que les frais d'installation d'une usine de ce genre, à un endroit donné du Canada, peuvent s'estimer d'une manière satisfaisante indépendamment des chiffres donnés.

Coût de production de la fonte.

Remarques générales. Les estimations ont été faites [illegible] production d'une tonne métrique de fonte (2,204 livres), [illegible] qui est, soit blanche, c'est-à-dire pauvre en silicium et du [illegible]re généralement fabriqué en Suède; soit grise, c'est-à-dire [illegible]e en silicium, fonte de fonderie ou du même genre.

Dans les estimations (a) et (b) le combustible employé est le charbon de bois tandis que le coke est employé pour les estimations (c) et (d). On ne doit pas perdre de vue le fait que l'emploi du coke n'a pas été heureux dans la production régulière des fours Elektrometall et ceci diminue la valeur des estimés basés sur son emploi probable.

Le minerai employé est probablement magnétique ou formé d'un mélange de magnétique et d'hématite, tel que celui qu'on emploie en Suède. Jugeant du total exigé il doit contenir environ 60% de fer.

Le fondant employé est la chaux vive, bien que un produit meilleur marché, le calcaire brut, soit employé régulièrement dans les usines suédoises.

(2) *Production.* Ce chiffre important n'est pas donné mais peut se déduire du chiffre de la consommation d'énergie électrique comme suit: pour un four de 4,000 C.V.:—

(a)	Fonte blanche au charbon de bois	29·6	tonnes	par jour.
(b)	" grise " "	27·4	"	"
(c)	" blanche au coke	28·8	"	"
(d)	" grise "	26·1	"	"

L'avancé que 6% de $360,000 représente 72 cents par tonnes de fonte correspond à une production quotidienne de 27·4 tonnes par four.

Le four de 4,000 C.V. de Domnarfvet, exploitant un minerai d'à peu près la même richesse, entre juillet 1913 et juin 1914 a fourni un rendement de 28·5 tonnes de fonte blanche par jour de travail, mais la production moyenne durant cette période de temps n'a été que de 26·4 tonnes par jour. Le four de 3,000 C.V. de Trollhättan, avec un semblable minerai, a produit en 1913, 22·05 tonnes par jour de travail et 20·08 tonnes de moyenne quotidienne. En augmentant ces chiffres d'un tiers pour un four de 4,000 C.V. nous avons 29·4 et 26·8 tonnes de fonte blanche par jou .

Prenant en considération ces chiffres on voit que, bien qu'on puisse attendre d'un four de 4,000 C.V. une production quotidienne de 29 à 30 tonnes quand il est continuellement en opération, il ne serait pas prudent de compter sur plus que 26 ou 27 tonnes par jour pendant une longue période de temps, c'est-à-dire 10% de moins que les chiffres donnés.

Bien qu'on puisse aussi attendre un facteur de rendemen plus élevé avec un groupe de trois fours plutôt qu'avec un seul four, et bien aussi qu'on puisse compter sur une faible augmentation par l'usage de la chaux vive au lieu de la pierre à chaux brute, il sera mieux, en préparant des estimés pour une nouvelle entreprise de faire figurer le rendement probable à 90% des chiffres ci-dessus.

(3) *Items principaux de frais.* On est porté à s'imaginer que dans la réduction électro-thermique des minerais de fer le principal item de dépense est le prix de l'énergie électrique mais, bien que ce facteur soit très important, ce n'est pas le plus élevé et il ne monte qu'à 20 pour cent des dépenses totales, ainsi qu'on peut le voir par les estimations. Dans chaque cas, le minerai représente une dépense plus élevée et, en fabriquant de la fonte au charbon de bois, le combustible coûte autant que l'énergie électrique.

(4) *Effet du rendement réduit.* Si le rendement du four est placé à 10 pour cent de moins que les estimations de M. Grönwall, les frais d'électricité, de main d'oeuvre, de bureaux et organisa-

tion, de réparations et dépréciations ainsi que les frais généraux et les faux frais seront augmentés dans la même proportion. Ceci représentera une augmentation de 75 cents par tonne dans l'exemple (a).

(5) *Intérêt et droit régalien.* Aucun montant n'a été porté au compte de l'interêt sur le capital montant qui serait d'environ $1.00 par tonne de fonte, non plus que pour le droit régalien qui doit être payé à la A/B Elektrometall pour employer leur type de four.

(6) *Minerai, combustible et fondant meilleur marché.* D'un autre côté, les chiffres donnés pour le minerai, le coke (quand on l'emploie) et la chaux peuvent être considérablement réduits dans des conditions favorables et on peut substituer le calcaire à la chaux vive, comme cela se fait en Suède.

(7) *Valeur des gaz échappés.* Les gaz produits dans le four peuvent s'utiliser pour chauffer un four Siemens-Martin et ils possèderaient un pouvoir calorique (par tonne de fonte) égal à celui du gaz produit par environ ¼ de tonne de charbon. Le coût de ce charbon et sa transformation en gaz peut passer à l'actif dans l'estimé des frais pourvu que ce gaz soit convenablement utilisé.

LE FOUR ÉLECTRIQUE RENNERFELT.

Ce type de four électrique pour fondre et raffiner le métal est tout nouveau. Jusqu'à présent il a trouvé son application particulièrement dans les fonderies d'acier où il a obtenu le plus grand succès dans ses modèles de petites dimensions, jusqu'à capacité de deux tonnes; et les inventeurs comptent étendre son usage aux plus grandes fonderies d'acier, de 50 tonnes et plus.

Principe. Le four est chauffé au moyen de l'arc électrique comme les fours Héroult ou Stassano, mais le principe de l'arc est différent. Il y a aussi des différences essentielles dans la construction du four.

Les fours électriques chauffés par des arcs peuvent se diviser en deux catégories principales: (1) les fours à arc indépendant, comme les fours Moissan ou Stessano, dans lesquels on maintient l'arc entre deux électrodes ou plus, et (2) les fours à chauffe directe, comme le four Héroult ou le Girod, dans lequel

chaque arc est formé entre une électrode de carbone et le métal ou autres matériaux que l'on veut fondre.

Dans le four à chauffe directe la chaleur de l'arc est dirigée plus directement sur les matériaux que dans le four du type Stessano et, conséquence, l'efficacité tend à être plus élevée; mais le chauffage direct par l'arc se dirige moins facilement et cause plus de variations dans l'énergie électrique, surtout, comme c'est l'usage dans la pratique des fonderies, quand on emploie le four à fondre des riblons froids ou tout autre métal froid.

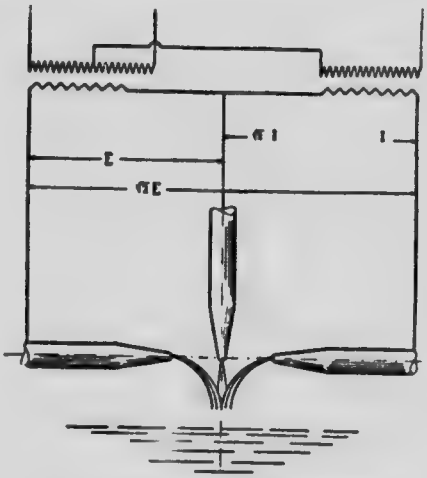


Fig. 3. Schéma du four Rennerfelt.

Déjà, en 1892, Henri Moissan employait un électro-aimant dans son four expérimental pour diriger l'arc vers le métal à fondre. De cette manière il augmentait l'efficacité de son four sans rien perdre de sa régularité ni de sa facilité de maniement. L'auteur ne savait pas qu'il existât un grand four électrique dans lequel un aimant ait été employé pour diriger l'arc sur le métal à fondre.[1] Mais M. Rennerfelt a obtenu le même résultat par un arrangement spécial des électrodes et sans se servir d'un aimant extérieur.

[1] Le four Anderson emploie des électro-aimants. Ils sont placés en dessous du four et dans le but de controler l'arc. D. Carnegie "Liquid Steel, its manufacture and cost" page 452.

Cet arrangement, comme le montre la figure 3, se compose de trois électrodes dont deux sont horizontales et la troisième verticale. Elles reçoivent un courant biphasé, l'électrode verticale servant de retour commun pour les deux autres. L'arc électrique qui se produit ne s'étend pas directement entre les trois électrodes mais forme une flamme verticale qui se dirige de haut en bas en partant de l'électrode verticale. De cette manière l'arc électrique est détourné vers la base par le courant électrique qui passe dans les électrodes et, plus le courant électrique est fort, plus la déviation est forte vers la base.

La figure 3 montre aussi les raccordements électriques qui permettent d'obtenir un courant biphasé de faible voltage de l'approvisionnement triphasé à haut voltage.

Construction. Le four consiste en une enveloppe cylindrique de tôle montée sur des tourillons de manière à ce qu'on puisse le pencher pour vider son contenu. A une extrémité, une ouverture munie d'une porte, sert à la fois pour le chargement et la coulée. L'enveloppe est doublée, d'abord de plaques d'amiante d'un pouce et quart d'épaisseur qui retiennent la chaleur et permettent la dilatation des briques, ensuite, naturellement, d'un rang de bonnes briques réfractaires, et, en dedans de ceci, d'un autre rang de briques de magnétite garnies, à la partie inférieure du four, avec une composition agglutinée de dolomite ou de magnésite.

Le mode de construction qui ressemble à celui d'un convertisseur de cuivre basique Pearce & Smith, permet aux briques de magnésite de servir pour la voûte comme aussi pour le foyer du four et, à cause de cela, on peut maintenir dans ce four une température très élevée sans crainte de fondre la voûte.

La disposition des trois électrodes dans le four est montrée à la figure 4 où l'on voit aussi que la cavité du four est ovale avec une ouverture au petit bout de l'ovale.

On emploie des électrodes traitées au graphite au lieu des électrodes en carbone amorphe meilleur marché dont on se sert habituellement dans les fours électriques. A cause de leur conductibilité plus élevée les électrodes traitées au graphite peuvent être bien plus petites que leurs équivalentes en électrodes de carbone amorphe et, pour cette raison, la différence dans le prix n'est pas très élevée.

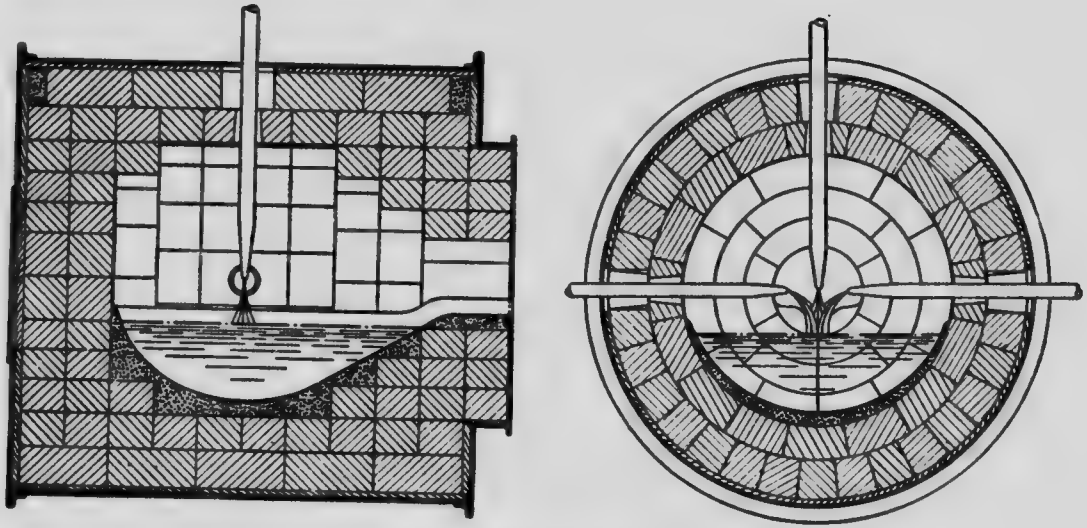


Fig. 4. Four Rennerfelt; coupe verticale et coupe horizontale.

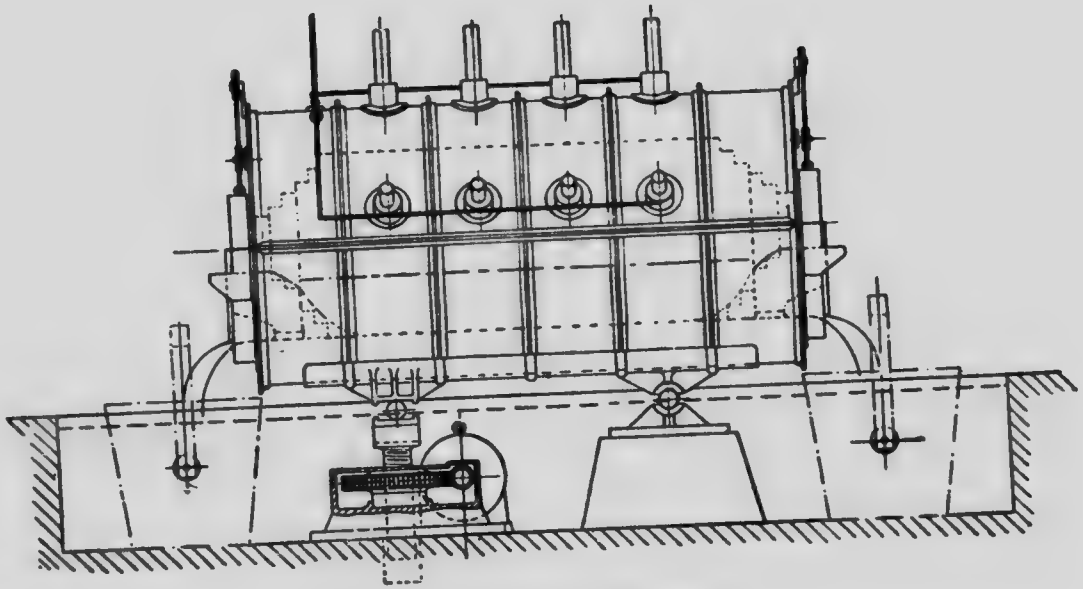


Fig. 5. Four Rennerfelt à arcs multiples.

De plus, à cause de leurs dimensions plus petites, la voûte du four n'est pas autant affaiblie par les ouvertures nécessaires bien qu'on doive pourvoir à l'entrée de trois électrodes au lieu de deux. Même dans les plus grands fours construits on n'a pas éprouvé de difficultés à employer les électrodes horizontales traitées au graphite. Pour les plus grands modèles (au-dessus, peut-être, de 3 tonnes) on a placé des électrodes supplémentaires ce qui évite d'avoir à employer des électrodes de fortes dimensions et ce qui distribue aussi la production de chaleur plus également dans tout le four.

La figure 5 montre le schéma d'un four Rennerfelt ayant quatre jeux d'électrodes. Il est cylindrique et muni d'une porte de chargement et d'un orifice de coulée à chaque extrémité. Il repose sur un bâti que l'on peut incliner par un mécanisme à pas de vis au lieu du support sur tourillons des modèles plus petits.

La planche VII représente un four de 2 tonnes ½ construit à Stockholm (où l'auteur l'a vu) et prêt à expédier aux usines Nobel, de Saint Pétersbourg. On voit distinctement la construction du four avec sa porte de chargement, ses tourillons, ses porteurs d'électrodes et ses régulateurs.

Résultats. Le premier four de ce modèle a été construit en 1912 et il a été rapidement employé par les propriétaires de petites fonderies d'acier. L'auteur a visité quatre fonderies de ce genre en Suède et il y a vu trois fours Rennerfelt variant en capacité de ½ tonne à 1 tonne, tous régulièrement exploités. Ceci en outre du four de 2 tonnes ½ dont nous venons de parler. Ceux qui emploient ces fours sont très enthousiastes à leur sujet et les fours semblent parfaitement adaptés aux fonderies d'acier et à beaucoup d'autres usages où il ne faut fondre que de petites quantités de métal.

De petits fours d'une capacité de 600 kilogrammes peuvent produire de l'acier fondu pour couler de petites pièces et ceci avec une charge froide, en dépensant 700 à 8[illegible] kilowatt-heures par tonne, quand on les exploite régulièrement. Cette consommation est tout à fait modérée pour un four aussi petit. En tenant compte des pertes par les arrêts on peut fixer à 1,000 kilowatt-heures le chiffre de la dépense en énergie pour la fonte

des petites pièces. L'usure des électrodes est donnée comme étant de 3 kilog. par tonne de fonte. Dans la plupart des fonderies que j'ai visitées l'énergie électrique servait, le jour à faire fonctionner les machines et, la nuit, à fondre l'acier dans le four électrique. Cette méthode d'utiliser l'énergie est, financièrement très avantageuse, mais elle ne fait pas voir le four sous un si beau jour au point de vue de la consommation électrique et de l'usure en électrodes par tonne d'acier, consommation et usure qui étaient plus élevées que ce que nous avons donné ci-dessus. Pendant le jour, on doit maintenir le four chaud au moyen d'un brûleur à pétrole ou d'une petite quantité d'énergie électrique.

L'énergie électrique nécessaire pour un four de 600 kgs. est 125 K.W. à 80 volts; pour un four de 1,000 kgs, 200 K.W. Pour les plus grands modèles l'énergie nécessaire par tonne de capacité diminuerait jusqu'à environ 120 K.W.

En outre de son emploi habituel pour la fonte des petites pièces d'acier on a utilisé le four Rennerfelt pour fondre le ferro-manganèse pour l'usage des procédés Bessemer ou Siemens-Martin et des essais faits à Hallstahammar et à Ljusne ont pu se comparer favorablement avec les essais faits d'autres types de fours.[1] La fusion d'une tonne de ferro-manganèse dans un four Rennerfelt préalablement chauffé a demandé environ 450 kilowatt-heures et moins de 2 livres d'électrodes. La perte de ferro par oxydation a été d'un peu plus que 1 pour cent.

Jusqu'à présent on a construit environ 20 de ces fours qui sont utilisés en Suède, Norvège, Angleterre et Russie; le plus grand a une capacité de 3 tonnes.

Grands modèles. Les fours contenant plus que 3 tonnes ne sont pas chauffés par un seul arc, comme les petits modèles, mais ont deux ou plusieurs séries d'électrodes, comme on le voit à la figure 5. M. Rennerfelt me dit que le four de 12 tonnes aura trois séries d'électrodes et 16′-6″ de long; il demandera 1,500 kilowatts. Un four de 40 tonnes devrait avoir quatre jeux d'électrodes de 6″ et 7″ de diamètre et demanderait 4,800 kilowatts.

---

[1] A Sahlin, The use of liquid-ferro-manganese in the steel process. Journal Iron & Steel Inst. 1914, II, page 213.

BIBLIOGRAPHIE.

"Rapport sur l'étude d'un four à cuve électrique à Domnarfvet, Suède" Eugène Haanel, Ph.D., directeur de la Division des Mines, Ottawa, 1909. Aussi "Amer. Electrochem. Soc." 1909, vol. XV, page 26.

"Progrès récents dans la construction des Fours Électriques pour la production de la Fonte, de l'Acier et du Zinc." Eugène Haanel, Ph.d., directeur de la Division des Mines, Ottawa, 1910.

"Electric Iron Smelting at Trollhättan," par J. A. Leffler, E. Odelberg et E. Nyström. Iron and Coal Trades Review, 1911, Vol. 82, pp. 957 et 1010. Iron and Steel Inst. 1911, II, p. 548. Met. and Chem. Eng. 1911, Vol. IX, pp. 368, 459, et 505.

"The Electric Reduction of Iron Ores, with special reference to results obtained at Trollhättan, Sweden, and in the Noble Furnace at Héroult, California", by Otto Frick. Met, et Chem. Eng., 1911, Vol. IX, p. 631.

"Recent progress in Electrical Iron Smelting in Sweden," by T. D. Robertson, Amer. Electrochem. Soc. 1911, Vol. XX, p. 375.

"Electric Iron Smelting at Trollhättan", by J. A. Leffler and E. Nyström. Iron and Coal Trades Review, 1913, Vol 86, p. 744. Iron and Steel Inst. 1913, I, p. 590.

"Le Haut Fourneau Électrique" par Paul Nicou. Annales des Mines, Mars et Avril, 1913.

"Neueres aus der Elektro-Roheisenerzengung Skandinaviens" par A. Beielstein, Charlottenburg. Stahl u Eisen, 31 Juillet 1913, Vol. XXXIII, p. 1270.

"Electric Iron Smelting" par Jens Orten-Boving. M. I. Mech. E. London. Canadian Engineer, Dec. 18, 1913, Vol. XXV, p. 877, and Iron Age, May 21, 1914, Vol. 93, p. 1269.

"Electric Iron Smelting", 1914, A/B Elektrometall, Ludvika, Suède, et Electro-Metals, Ltd., 9½ Union Court, Old Broad Street, London, E.C.

"The Rennerfelt Electric Furnace", A/B Elektriska Ugnar, Stockholm, 1914.

TABLE DES POIDS, MESURES ET MONNAIES.

1 Krone (Couronne suédoise)	= 100 öre ou 27 ct.
1 Kilogramme	= 2·204 livres avoirdupoids
1 grosse tonne	= 2,240 livres avoirdupoids
1 tonne métrique	= 2,204 livres avoirdupoids
1 petite tonne	= 2,000 livres avoirdupoids
1 mètre	= 100 centimètres ou 1,000 millimètres.
1 mètre	= 39·37 pouces.
1 centimètre	= 0·39 pouce
1 millimètre	= 0·039 »
1 litre	= 1,000 centimètres cubes ou 1·761 chopines imp.
1 hectolitre	= 100 litres ou 6,103 pc. cube
1 boisseau de charbon de bois	= 2,748 pouces cubes[1]
1 hectolitre	= 2·22 boisseaux de charbon
1 cheval vapeur (anglais)	= 33,000 pieds-livres par minute ou 746 watts.
1 cheval vapeur (métrique)	= 75 kilogramètres par seconde ou 736 watts.
1 Kilowatt-heure	= 860 kilogrammes calories

Les tonnes métriques et les chevaux-vapeur métriques sont usités en Suède et c'est à eux que l'on fait allusion dans ce travail, sauf quand il est autrement spécifié.

[1] C'est là un boisseau débordant; le boisseau impérial est de 8 gallons ou 2,218 pouces cubes. Métallurgie générale, Hoffman, p. 214. Journal U.S. Assoc. of charcoal Iron workers 1880-81, ii. pp. 128, 256.

PLANCHE I.

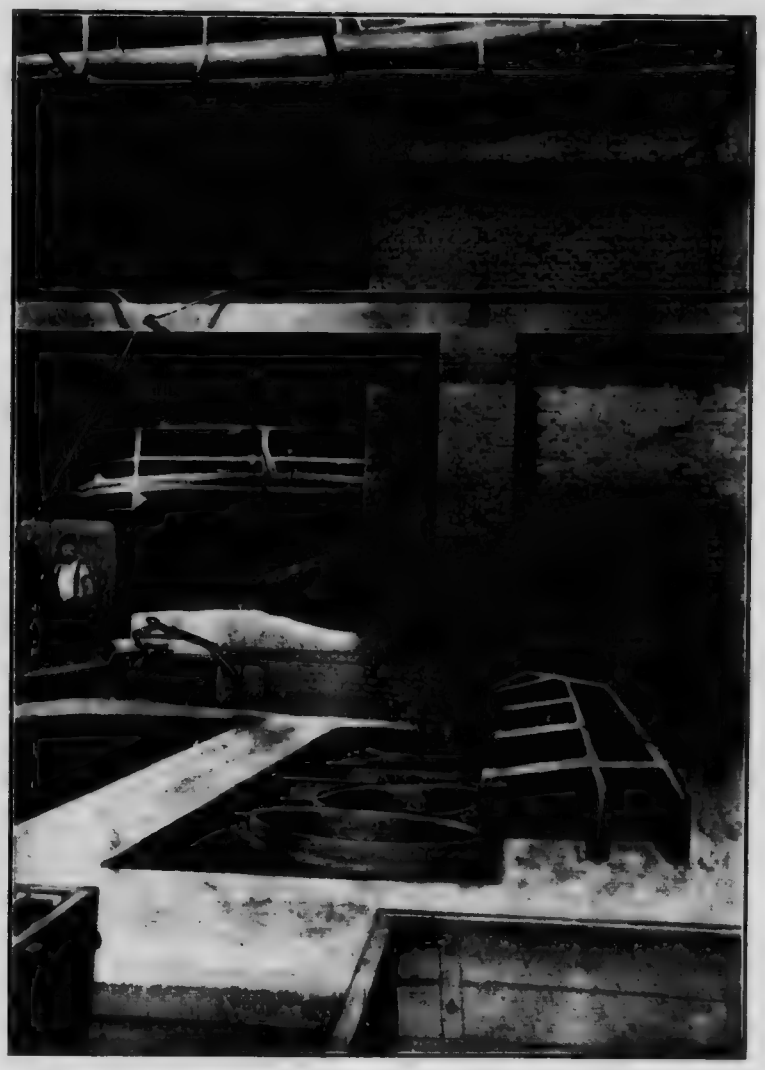
Four Elektrometall: Voûte du creuset et contacts des électrodes.

PLANCHE II.

Four Elektrometall, photographie montrant les électrodes.

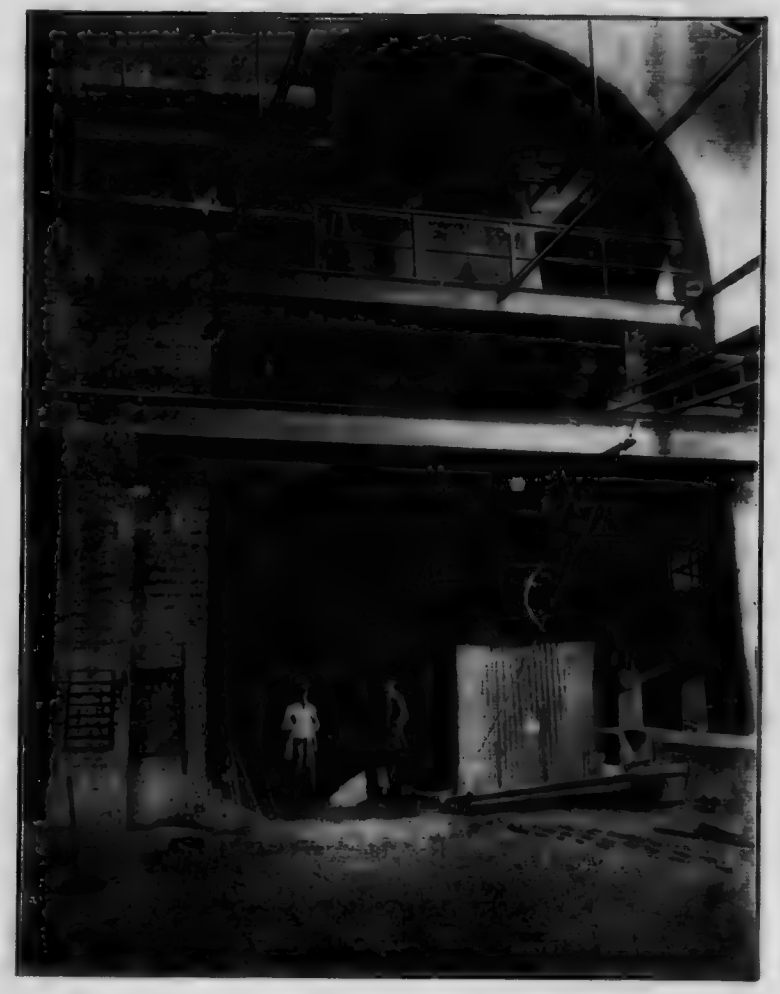
Four Elektrometall: guides des électrodes et orifice de coulée.

PLANCHE IV.



Four Elektrometall; montrant la distribution du métal et des laitiers.

PLANCHE V.



Vue générale du four Elektrometall.

PLANCHE VI.

Four Elektrometall. Vue de l'atelier des moulages.

PLANCHE VII.

Four Rennerfelt de 2 tonnes et demie.

INDEX.

A.

Air, Refroidissement par l', des fours électriques 2, 16

B.

Beielstein, A.—Travail sur la réduction électrique du fer en Suède 62
Bibliographie 62
Böving, J. O.—Liste des fours électriques en Suède 32
" " Travail sur la réduction électrique du fer 62
Bristol Mine, (Canada) qualité du minerai de 9

C.

Canada, perspective de la réduction électrique du fer 1, 8
" coût estimé d'une usine de réduction électrique 50
" coût estimé d'un four électrique pour la fonte 50
" minerais de fer ne valant pas ceux de la Suède 8
Californien (E.U.) Type de four électrique 1, 4, 20, 62
Cappelen, M.—exploitation du four Tinfos à Notodden 32
Charbon de bois: coût du, dans la réduction électrique du minerai de fer . 34, 50
" " combustible usité pour la réduction du fer en Suède 7, 52
" " combustible usité pour les fours "Elektrometall" 7, 8
" " plus nécessaires pour les minerais hématites que pour les magnétiques 15
" " mesure cubique du 64
" " consommation par tonne de fonte produite 14, 15, 34
Coke: consommation par tonne de fonte produite 29, 30, 50, 51
" " plus élevée pour les minerais hématites que pour les magnétiques 29, 30
" coût du, dans la réduction électrique du fer 51
" absence du charbon à coke en Norvège 49, 50
" sans succès (jusqu'ici) dans les fours "Elektrometall" 8
" usité dans le four Tinfos 46, 47
Chauffage préalable des minerais dans le four électrique 1, 4, 6, 16, 19
Combustible, consommation dans le four électrique, (voir Coke et Charbon) 14, 34
" coût du 34, 50
" emplois comparés du coke et du charbon de bois 7, 8, 47, 48

D.

Domnarfvet, Fours électriques de 8, 31, 34, 37
" Minerais chargés en hématite phosphorique employés à .. 32
" Usage des laitiers Bessemer pour leur manganèse et leur apatite fournissant du phosphore 32
" Production de fonte contenant 2% de P 32
" Essais faits avec le four Helfenstein à 6

E.

Électrodes, description des, dans le four "Elektrometall" 2, 3, 5, 16, 37
" " Tinfos 44
" " Rennerfelt 56, 57, 59
" supériorité de celles traitées au graphite sur les électrodes en carbone amorphe dans le four à acier 56
" consommation et coût des 15, 34, 35, 43, 51, 59, 60
" porteurs pour 3, 25
Électrothermique, Usines de réduction visitées par l'auteur 1
" en Suède 31
" en Norvège 32
Énergie électrique, consommation et prix de l' 34, 35, 38, 43, 50, 59
" " diminution avec l'augmentation de CO_2 dans les gaz 18

F.

Fer (voir fonte)
Fer, minerai de, produits, nature et analyses 8, 9, 14, 32, 33, 34
Fer, coût du minerai de 34
Fondants, Chaux vive préférable à la pierre à chaux 8, 30
" consommation et coût des 19, 34, 40
Frick, Otto, rapport sur la réduction électrique des minerais de fer 62
Fonte: électrique, qualité de 8, 14, 32, 33, 34
Fonte de Suède, qualité élevée de la 8, 9, 32, 33
Fonte, coût de sa production en Suède 50, 51, 52, 53
Four électrothermique, deux types principaux pour la réduction du fer 1, 2, 16
" " efficacité commerciale du 10
" " pour fabriquer l'acier 19
" " efficacité technique du 16
" " four sans cuve mieux adapté pour fabriquer la fonte de fonderie 19
" " nombre d'hommes nécessaires pour le fonctionnement 35
" " nombre, capacité et position, en Suède et en Norvège 31, 32
" " Coût et entretien des usines électrothermiques de réduction du fer en Suède et au Canada 36, 50
Four "Elektrometall", description du 1, 2, 5
" " efficacité commerciale du 10
" " " technique du 16
" " " Coût du 50, 52
" " difficulté d'employer des minerais pulvérisés 6, 7
" " effets de la circulation des gaz sur l'économie du 26, 29
" " charbon employé dans le 6, 7
" " qualité élevée de la fonte du 6
" " valeur du produit n'est pas déterminée seulement par l'analyse chimique 6, 7
" " beaucoup employés en Suède 2
" " A/B Ludvika, Suède et "Electro Metals" Londres 17, 28, 30, 32, 62

G.

Gaz, valeur des, provenant du four électro thermique 4, 16, 41, 42
Gaz, circulation dans les divers types de fours électriques pour réduction des minerais 3, 15, 16, 17, 18, 19, 26, 41, 48

Gaz, leur lavage en sortant des fours électriques 3
Grönwall, A. estimé du coût d'une usine de réduction électrique au Canada 48, 49
" estimé du coût d'un four électrique pour la fonte, au Canada 14, 50
" visite par l'auteur (Voir lettre d'envoi).

H.

Haanel, Eugène, recherches par 9, 37, 46, 61
Haanel-Heroult, four électrique 45, 46, 47
Hagfors, fours électriques à 31, 32, 39
" consommation d'énergie électrique dans les fours de 14, 35
" consommation de charbon de bois dans les fours électriques à 14
" qualité de la fonte fabriquée à 33
" hommes employés à, et leurs salaires 36
Hallstahammar, essai du four Rennerfelt à 60
Helfenstein, four électrique, citations à ce sujet 1, 31, 37, 49
" description du four de 4
" comparaison avec le four "Elektrometall" 6, 7
" minerais magnétiques, sans phosphore, employés à 33
" expérience du four, en Suède 2
" encore à la période des essais à 19

I.

Introduction 1

J.

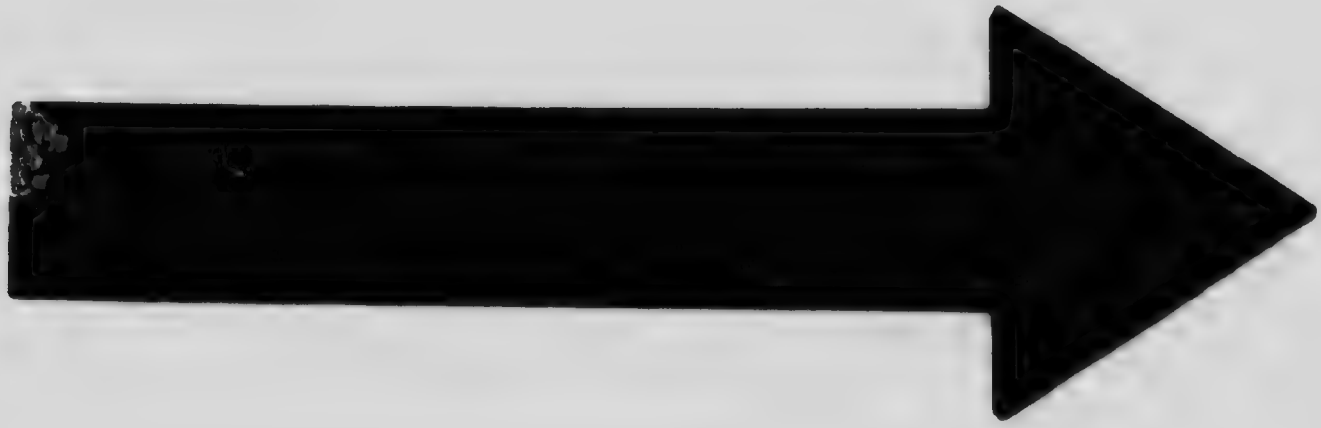
"Jernkotoret" premiers propriétaires du four de Trollhättan 42

L.

Leffler et Nyström, calculs par 16, 19
" " rapports par 62
Ljungberg, Dr. E. J.—note sur le décès de 4
Ljusne, four électrique de 32
" " essais du four Rennerfelt à 60
Lorentzen, Hans Bie; four électrique inventé par 44
Lavage des gaz provenant des fours électriques 3

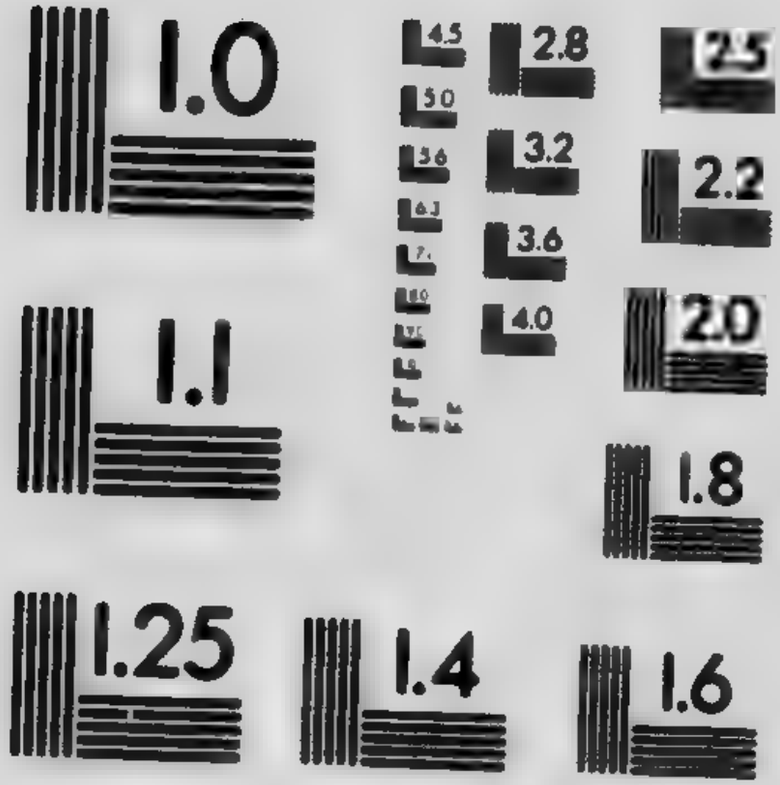
M.

Main d'oeuvre employée et salaires 35
" " " " " à Hagfors 41
Minerais, pulvérisés, en usage dans le four electrique 2, 7, 33, 34, 42
" canadiens, chargés de soufre et inférieurs aux norvègiens 9
" suèdois 9, 32, 33, 38
" " leurs essais dans la réduction électrique n'ont pas résolu le problème de l'élimination du soufre 9
" norvègiens 46
" du Sault Ste. Marie. Les expériences prouvent qu'on peut éliminer le soufre dans le four électrique 10
" Coût des 34, 50, 54
" Dannemora, employé dans les fours "Elektrometall" de Soderfors 33
Moissan, Henri, usage de l'aimant dans le four électrique 55
Monnaies de Suède 62



MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART

(ANSI and ISO TEST CHART No. 2)



APPLIED IMAGE Inc
1653 East Main Street
Rochester, New York 14609 USA
(716) 482 - 0300 - Phone
(716) 288 - 5989 - Fax

N.

Nicou, Paul: travail sur la réduction électrique du fer 44, 62
Noble Electric Steel Co., exploitant les fours de Héroult, Californie... 4
Norvège, fours électrothermiques en 1, 2, 5, 32, 44, 49
" minerais de fer en 46
Notodden, fours électriques de 5, 32, 44
" genre de fonte fabriquée à 34, 46, 48, 49
" consommation d'énergie électrique à 35, 46, 48
" minerais en usage dans les fours de 46
Nykroppa: fours électriques de 32
Nyström: calculs et rapports de (Voir Leffler).

O.

Odelberg, F.—Rapport par Leffler, Odelberg et Nyström. (V. Leffler).

P.

Poids et mesures de Suède 62
Phosphore, dans les minerais norvégiens et suédois et les fontes des fours électriques 32, 33, 34, 38, 40, 43, 46

R.

Refroidissement par l'eau des fours électriques 15
" l'air des fours électriques 43
Rennerfelt, four électrique de, construction, etc. 54, 62

S.

Salaires, taux payés dans les usines de réduction électrique 35, 36
Söderfors fours électriques en construction à 31, 32
" emploi des minerais Dennemora à 33
Stora Kopparbergs Berglags A/B: essai des fours Helfenstein à Domnarfvet 6
" " " essais des fours Elektrometall à Domnarfvet 31, 37
" " " essais des fours "Elektrometall" à Söderfors 31
Strömasnas Jernverks A/B; propriétaires du four de Trollhättan 32, 42
Soufre, élimination du, dans les fours électriques 9, 10, 48
" en grande quantité dans les minerais canadiens 9
" en petite " " " " suèdois 9, 32, 33, 34, 38
" dans les minerais norvégiens 46
" peut être éliminé par le procédé de réduction électro-thermique 10
Suède, usines de réduction électrique en opération en 7, 31, 32
" qualité élevée de la fonte produite en 8, 9, 32, 33
" grandes usines en construction au nord de la 32
" monnaies, poids et mesures de 62

T.

Table des monnaies, poids et mesures 62
Tinfos, four, en opération en Norvège 1, 2
„ description du four 5, 44, 48
„ Jenrverk A/S, propriétaires du four Tinfos à Notodden .. 5, 32, 44, 46
Trollhättan: fours "Elektrometall" de 32, 42, 43
„ „ „ efficacité des 16, 17, 18
„ „ „ distribution du calorique 20
„ „ „ charge et qualité de la fonte 33, 34
„ „ „ production moyenne 32, 53

U.

Uddeholms Aktiebolag: propriétaires des trois fours électriques de Hagfors 31, 39
Ulefos: Four Tinfos en opération à 32